



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VESA KUHNO  
SAVUNPOISTOLUUKKIJEN JA KATTOVALOKUPUJEN U-  
ARVON LASKENTA  
Diplomityö

Tarkastajat: professori Juha Vinha ja  
kehitysinsinööri Lauri Halme

Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 6. helmi-  
kuuta 2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**KUHN, VESA:** Savunpoistoluukkujen ja kattovalokupujen U-arvon laskenta

Diplomityö, 77 sivua, 35 liitesivua

Maaliskuu 2013

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: professori Juha Vinha ja kehitysinsinööri Lauri Halme

Avainsanat: Savunpoistoluukku, kattovalokupu, U-arvo, lämmönläpäisykerroin

Tutkimuksen tavoitteena oli selkeyttää savunpoistoluukkujen ja kattovalokupujen U-arvon laskentaa. Keskeisimpinä ongelmakohtina oli sääntöjen ja ohjeiden pirstaleisuus sekä niiden tulkinnanvaraisuus. Selvityksen pohjalta määritettiin U-arvoja tietyille rakenteille ja tutkittiin luukkujen tukirakenteiden vaikutusta U-arvoihin. U-arvojen laskenta sekä rakenteiden analysointi tehtiin pääsääntöisesti Comsolilla Multiphysics -tietokoneohjelmalla, joka on elementtimenetelmään perustuva numeerinen laskentaohjelma. Comsolilla saatuja tuloksia verrattiin, siinä määrin kuin se oli mahdollista, käsinlaskettuihin tuloksiin. Tarkastelujen pohjalta kehitetään yksinkertainen Excel-laskentapohja, jonka avulla voidaan laskea suuntaa-antavia U-arvoja erikokoisille luukuille.

Standardien tutkimuksen pohjalta päädyttiin käyttämään rakenteiden ulkomittoja U-arvon määrittämisessä. Pinta-ala valinnasta pidetään kiinni laskennan alusta loppuun asti, koskien myös viivamaisten lisäkonduktanssien määrittäystä. Kyseisellä valinnalla ei olla ristiriidassa keskeisten EN standardien ohjeistuksen kanssa. Valinta saattaa aiheuttaa kuitenkin ristiriitaa joidenkin maiden kansallisten määräysten kanssa. Tutkittujen rakenteiden U-arvot ovat keskimäärin noin 30 % pienempiä käytettäessä laskennassa ulkopintoja verrattuna tilanteeseen, jossa käytetään rakenteen sisäpintoja.

Tutkittaessa rakenteiden vaikutusta U-arvoihin havaittiin, että ulkopinnasta sisäpintaan ulottuvat metalliosat kasvattavat rakenteen U-arvoa noin 110 %...300 %. Vastaavat puuosat kasvattivat luukkujen U-arvoa puolestaan 15 %...45 %. Kun verrattiin rakenteiden reunoilla kulkevien tukirakenteiden ja rakenteiden keskellä kulkevien rankojen vaikutusta U-arvoihin, havaittiin että sekä puurakenteisissa että metallirakenteisissa luukuissa lämpöä johtuu hieman enemmän reunoilla kulkevien tukirakenteiden kautta kuin rakenteiden keskellä kulkevien rankojen kautta. Lisäksi havaittiin, että pienimmät U-arvot saatiin käyttämällä Comsolissa hienojakoisinta mahdollista verkkoa.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**KUHNO, VESA:** Calculation of U-value of roof lights and smoke vents

Master of Science Thesis, 77 pages, 35 Appendix pages

March 2013

Major: Structural engineering

Examiners: Professor Juha Vinha and development engineer Lauri Halme

Keywords: Smoke vent, roof light, U-value, thermal transmittance

The aim of the study was to clarify the calculation of U values for natural smoke and heat exhaust ventilators (NSHEV). The main problems of the issue were lack of uniform calculation methods and rules and the fact that those rules opened to interpretation. Based on the study of those particular rules and methods the U-values of some NSHEVs and roof lights were calculated. Also effect of different structural combinations on U-value were studied. The calculations and analyses were made mainly using Comsol Multiphysics computer program which is finite element method (FEM) based calculation program. Comsol calculation results were compared calculations made manually as far as it was possible. Based on calculations there will be developed simple Excel calculation sheet. The calculation sheet can be used as illustrative purpose only to estimate the U-values of different size NSHEVs and roof lights.

Based on the study the external dimensions were chosen to be used in U-value calculations. The decision applies also for calculation of linear thermal transmittance. The decision forms no conflict against key EN standards but can conflict with some national calculation rules. The U-values of studied structures were approximately 30 % smaller using external dimensions than U-values using internal dimensions.

Studying the effect of loadbearing structures on U-values the calculations revealed that metal structures added U-value 110 %...300 % and wooden structures 15 %...45 % compared to the structure where there was no load bearing structures. When comparing loadbearing structures against each other it seemed that horizontal beams in the edges of structures had slightly bigger impact on U-values than vertical studs. The observation applies for metal- and wood framed hatches. The smallest U-values were achieved when using finest mesh in Comsol.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksella Kera Groupin (ent. Keraplast) tilaamana tutkimuksena. Työssä selvitettiin savunpoistoluukkujen ja kattovalokupujen U-arvon laskentaa EN-standardien mukaan sekä laskettiin muutamien tuotteiden U-arvoja numeerisella laskentaohjelmalla.

Haluan kiittää Kera Groupia ja Juha Vinhaa aiheesta diplomityöhöni ja työni tarkastamisesta. Erityiskiitokset Pasi Nihtilälle ja Markus Hämeelle, jotka opastivat ja antoivat tietoa rakenteiden yksityiskohdista laskentamallien tekoa varten. Kiitän myös kollegoitani rakennustekniikan laitoksella, erityisesti Anssi Laukkarista. Heidän neuvot ja mielipiteet antoivat uutta näkökulmaa työhöni.

Suuret kiitokset kuuluvat vanhemmilleni Martille ja Leenalle sekä veljelleni Juhalle, jotka ovat tukeneet minua koko opintojeni ajan.

# SISÄLLYS

Abstract .....	iii
Termit ja niiden määritelmät .....	vii
1 Johdanto.....	1
1.1 Tutkimuksen tausta.....	1
1.2 Työn tavoitteet ja sisältö .....	2
1.3 Tutkimuksen rajaukset.....	2
2 Savunpoistoluukut ja kattovalokuvut .....	3
2.1 Savunpoistoluukkujen ja kattokupujen osat.....	3
2.2 Savunpoistoluukkujen sekä kattokupujen ominaisuudet ja käyttö rakennuksissa .....	3
3 Energiatehokkuuteen liittyvien keskeisten suureiden määrittäminen .....	6
3.1 Energiatehokkuus ja U-arvot muissa maissa .....	6
3.2 Liitoksesta aiheutuvan viivamaisten lisäkonduktanssin määrittäminen .....	7
4 Savunpoistoluukkujen ja kattovalokupujen U-arvon laskenta standardin EN 1873 mukaan .....	11
4.1 Laskennan periaate .....	11
4.2 Jalustan ja läpinäkyvän kansiluukun U-arvon laskenta standardin EN ISO 6946 mukaan.....	14
4.2.1 Lämmönvastus ja lämmönvastuksen ylä- ja alaraja-arvo .....	14
4.2.2 Korjaustermit.....	16
4.2.3 U-arvo ja korjattu U-arvo.....	19
4.3 Läpinäkyvän kansiluukun U-arvon laskenta standardin EN 673 mukaan .....	20
4.4 Kansiluukun ja jalustan pinta-alojen määrittäminen .....	24
4.5 Reunaprofiilin U-arvon ja reunaprofiilin ja kansiosan välisen kylmäsilan viivamaisten lisäkonduktanssien laskenta standardin EN ISO 10077-2 mukaan ...	26
4.5.1 Suljetut ontelot profiilissa .....	27
4.5.2 Hieman ja hyvin tuuletetut kolot profiilissa.....	29
4.5.3 U-arvon määrittäminen .....	30
4.5.4 Kylmäsilan määrittäminen .....	31
4.6 Reunaprofiilin pinta-alan määrittäminen .....	32
4.7 U-arvon numeerinen laskenta standardin EN ISO 10211 mukaan .....	32
5 Tuotteiden mallintaminen ja U-arvon laskenta.....	35
5.1 Käytetty mallinnusohjelma .....	35
5.2 Käytetty laskentaohjelma.....	35
5.3 Tarkasteltavat rakenteet .....	38
5.3.1 Jalustojen yksityiskohtia .....	41
5.3.2 Kansien yksityiskohtia .....	47
5.4 Käytetyt laskentamallit .....	50
5.4.1 Elementtiverkko .....	51
5.4.2 Geometria.....	51

5.4.3	Materiaaliominaisuudet .....	53
6	Laskentatulokset ja tulosten analysointi.....	56
6.1	Tulokset kokonaisten luukkujen laskentamalleista. ....	56
6.2	Tulokset kannen ja jalustan laskentamalleista .....	60
6.2.1	Metallisten yksityiskohtien vaikutus U-arvoihin .....	61
6.2.2	Puisten yksityiskohtien vaikutus U-arvoihin .....	62
6.2.3	Metallisten osien vaikutus kannen ja jalustan U-arvoihin .....	62
6.2.4	Puisten osien kannen ja jalustan U-arvoihin .....	65
6.3	Laskentatavan vaikutus U-arvoihin.....	67
6.3.1	Elementtiverkon vaikutus tuloksiin .....	67
6.3.2	Rakenteiden jako tarkasteltaviin osiin .....	69
6.3.3	Puisten jalustojen U-arvot laskettuna EN ISO 6946 mukaan .....	70
7	Tulosten epävarmuustekijöitä .....	72
8	Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet.....	73
	Lähteet.....	74
	Liitteet .....	77

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

<b>U-arvo</b>	U-arvo eli lämmönläpäisykerroin kuvaa aikayksikössä rakenteen läpi menevää lämpöenergian määrää pinta-alayksikköä ja lämpötilaeroa kohden
<b>Korjattu U-arvo</b>	U-arvo jossa on otettu huomioon korjauskertoimet. Kun ilmoitetaan rakenteen virallinen U-arvo, käytetään korjattua U-arvoa
<b>Lämmönvastus</b>	Kuvaa kappaleen kykyä vastustaa lämpövirtaa kappaleen läpi. U-arvon käänteisluku.
<b>Lämmönjohtavuus</b>	Kuvaa lämpövirran määrää aineen läpi pituusyksikköä ja lämpötilaeroa kohti
<b>Korjaustermi</b>	Käytetään U-arvo laskennassa ottamaan huomioon rakenteessa olevat epäsäännöllisyydet, jotka aiheuttavat muutosta rakenteen U-arvoon, verrattuna ideaaliin rakenteeseen
<b>Lämmönvastuksen alaraja</b>	Lämmönvastus laskettuna niin, että rakenteessa olevat epähomogeeniset rakennekerrokset on muutettu homogeenisiksi
<b>Lämmönvastuksen yläraja</b>	Lämmönvastus laskettuna niin, että rakenne on jaettu osa-alueisiin, joista kukin osa-alue muodostuu homogeenisistä rakennekerroksista
<b>Lämpösäteily</b>	Sähkömagneettista säteilyä, joka syntyy kappaleen atomien lämpöliikkeestä. Lämpösäteily ei tarvitse väliainetta edetäkseen
<b>Lämmön konvektio</b>	Lämpöenergian siirtymismuoto, jossa lämpöenergia sitoutuu väliaineeseen ja liikkuu aineen virtauksen mukana
<b>Lämpövirran tiheys</b>	Lämpövirta jaettuna tarkasteltavalle pinta-alalle
<b>Lämmönsiirtokerroin</b>	Kerroin, joka kuvaa kuinka hyvin kappale siirtää lämpöenergiaa

<b>Kylmäsilta</b>	Yleisnimitys pistemäiselle tai viivamaiselle kohdalle rakenteessa, jonka lämmönjohtavuus poikkeaa merkittävästi muun rakenteen lämmönjohtavuudesta
<b>Viivamainen lisäkonduktanssi</b>	Liitoskohdasta tai materiaalirajapinnasta aiheutuva muutos lämpöenergian johtumiseen. Etumerkki riippuu tarkasteltavien pinta-alojen määrittelystä
<b>Adiabaattinen pinta</b>	Pinta, joka estää lämpöenergian siirtymisen kappaleen ja ympäristön tai toisen kappaleen välillä



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Energiankulutus on keskustelunaiheena monissa eri foorumeissa nykypäivinä. Energiankulutuksenhallinnan yksi päätavoitteista on rajoittaa kasvihuonekaasupäästöjä ja ehkäistä täten ilmastonmuutosta. Kun tarkastellaan energiankulutusta Suomessa, voidaan havaita että noin 40 % tuotetusta energiasta kuluu rakennuksissa [1]. Euroopan komissio on antanut vuonna 2002 EPBD 2020– direktiivin, joka velvoittaa jäsenmaat rakentamaan lähes nollaenergia taloja vuoden 2020 jälkeen. [2]. Tämä aiheuttaa muutoksia nykyisin käytössä oleviin rakenteisiin ja taloteknisiin järjestelmiin. Rakenteiden U-arvo tasot ovat nykyään niin matalalla tasolla, että niitä tuskin tullaan kiristämään tulevaisuudessa, ellei mitään ennakoimatonta tapahdu. Koska rakenteiden U-arvo vaatimukset ovat niin kireät, läpivientien ja muiden epäsäännöllisyyksien lämpötekniinen toiminta rakenteissa korostuu.

Palotilanteessa savunpoistoluukut luovat savuttoman kerroksen lattian yläpuolella poistamalla savua. Ne poistavat samanaikaisesti kuumia kaasuja, joita vapautuu tulipalon eri kehitysvaiheissa. Savuttomia alueita leijuvan savukerroksen alapuolelle luovien järjestelmien käyttö on yleistynyt. Ne ovat vakiinnuttaneet asemansa ihmisten poistumisen helpottamisessa rakennuksista, palon aiheuttamien vahinkojen ja taloudellisten menetysten vähentämisessä estämällä savuvahinkoja, helpottamalla sammutusvoimien pääsyä palo-alueelle, näkyvyyttä parantamalla, alentamalla kattolämpötiloja sekä hidastamalla palon leviämistä [8]. Suomessa on arviolta noin 12700 asuinkerrostalossa jonkinlainen savunpoistojärjestelmä ja julkisissa palvelu- liike- toimisto- teollisuus- ja varastointirakennuksissa asennettuja savunpoistolaitteita on arviolta noin 18000 [5, s. 7]. Kattovalokupujen pääsääntöinen tehtävä on puolestaan mahdollistaa luonnonvalon käyttö tilojen valaisemisessa. Kattokupuja voidaan tilanteesta ja niiden rakenteista riippuen käyttää myös savunpoistoluukkuina.

Kun savunpoistoluukku tai kattokupu asennetaan rakennukseen, joudutaan rakenteeseen tekemään läpivienti, joka puhkaisee yhtenäisen lämmöneristekerroksen. Puhkaistu lämmöneristekerros korvataan savunpoistoluukun tai kattokuvun rakenteella, joka näin ollen korvaa poistetun osan lämmönvastuksen. Karkealla tasolla voidaan todeta, että mitä parempi lämmönvastus savunpoistoluukulla tai kattokuvulla on, sitä vähemmän liitoskohdasta aiheutuu ylimääräistä lämpöhäviötä.

## **1.2 Työn tavoitteet ja sisältö**

Diplomityön tavoitteena on selvittää katto- ja savunpoistoluukkujen U-arvon laskenta-perusteita ja laskea U-arvoja tietyille Kera Group Oy:n savunpoisto- ja kattovalokupurakenteille. Keskeinen osa edellä mainittujen tuotteiden U-arvon laskennassa on rakenteiden sisäisten liitosten aiheuttamien kylmäsiltojen määrittäminen, missä apuna käytetään numeerista laskentaohjelmaa. Laskentaohjelman avulla voidaan määrittää liitoksista aiheutuvien viivamaisten lisäkonduktanssien arvoja. Laskelmien perusteella tehdään Excel-laskentapohja, jolla voidaan arvioida luukun koon vaikutusta rakenteen U-arvoon.

## **1.3 Tutkimuksen rajaukset**

Tutkimuksessa tarkastellaan savunpoisto- ja kattovalokupujen U-arvoa rakennuksen ja ympäristön normaaleissa lämpötiloissa. Tutkimuksessa ei oteta kantaa savunpoisto- ja kattoluukkujen lämpötekniisiin ominaisuuksiin palotilanteissa tai muissa normaalista poikkeavissa tilanteissa. Tutkimuksessa ei tarkastella kosteuteen tai kosteuden siirtymiseen savunpoistoluukun tai kattokuvun rakenteissa liittyviä asioita. Savunpoistoluukujen ja kattovalokupujen U-arvoja voidaan määrittää myös kokeellisesti, mutta tässä työssä esitetyt U-arvot perustuvat laskentaan.

## **2 SAVUNPOISTOLUUKUT JA KATTOVALOKUVUT**

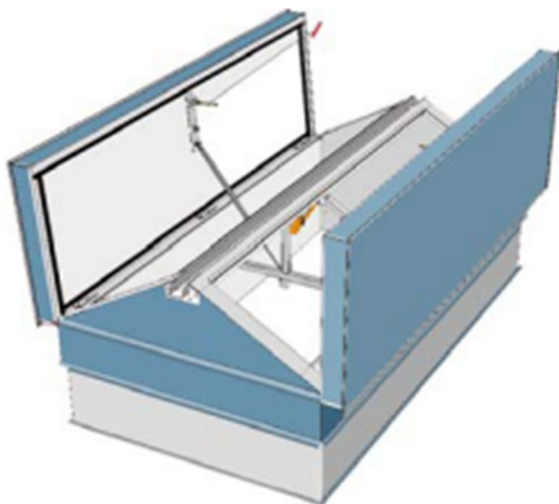
### **2.1 Savunpoistoluukkujen ja kattokupujen osat**

Savunpoistoluukut ja kattokuvut koostuvat pääsäännöisesti jalustasta, kupu- tai umpinai-  
sesta kansiosasta ja luukun avausmekanismista. On olemassa muitakin kokoonpanorat-  
kaisuja, mutta niiden ominaisuudet ja soveltuvuus rakenteisiin tulee testata ja tutkia.  
Savunpoistoluukkuihin voidaan asentaa lisäksi muita lisäosia, jotka parantavat niiden  
turvallisuutta, käytettävyyttä ja rakenteellista toimivuutta. Tällaisia lisäosia ovat muun  
muassa murtosuoja, putoamissuoja, raja-kytkin sekä vesipelti.

Luukkujen jalusta koostuu pääsäännöisesti tukirakenteista, lämmöneristeestä ja pintama-  
teriaaleista. Tavanomaisesti käytettyjä materiaaleja ovat teräs, puu ja erilaiset rakennus-  
levyt. Jalustan tulee täyttää kantavuusvaatimukset sekä käyttö- että tulipalotilanteessa.  
Kansiosa voi olla umpinainen, jolloin se on yleensä rakenteeltaan samanlainen kuin  
jalusta, tai läpinäkyvä. Tyypillisesti käytettyjä materiaaleja läpinäkyvässä kansiluukussa  
on akryylimuovi (PMMA), polykarbonaatti (PC) tai lasi. Monikerroksisten lasirakentei-  
den välissä voidaan käyttää lisäksi argonia tai muita passiivisia täytekaasuja rakenteen  
lämmöneristävyyden parantamiseksi.

### **2.2 Savunpoistoluukkujen sekä kattokupujen ominai- suudet ja käyttö rakennuksissa**

Savunpoistoluukkujen (kuva 2.1) pääasiallinen tehtävä on poistaa savua ja palokaasuja  
palavasta rakennuksesta. Tällä toimenpiteellä edesautetaan käyttäjien ja pelastushenki-  
lökunnan toimintaa tulipalotilanteessa [6]. Normaleissa olosuhteissa savunpoistoluuk-  
kuja voidaan käyttää päätarkoituksensa lisäksi esimerkiksi rakennuksen tuulettamiseen.  
Savunpoistoluukkuja voidaan ohjata joko manuaalisesti tai automaattisesti niille tarkoi-  
tetuista ohjauskeskuksista. On tärkeää että järjestelmä on suunniteltu, valmistettu ja  
asennettu ammattilaisten toimesta toimimaan oikein ja loogisesti tulipalon sattuessa.

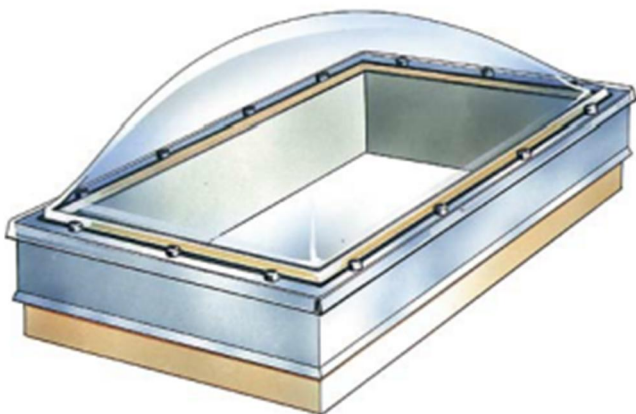


**Kuva 2.1.** Esimerkkirakenne savunpoistoluukusta.

Euroopassa savunpoiston suunnittelua ohjaa standardi EN 12101 ja Suomessa lisäksi Suomen rakennusmääräyskokoelman osa E sekä Suomen rakennusinsinööriliiton julkaisu RIL 232-2012. Savunpoiston suunnittelua varten tarvitaan tietoa mm. kohteen käyttötarkoituksesta, palo-osastojen koosta ja määrästä, korvausilma-aukkojen pinta-alasta ja sijainnista sekä kaasujen virtausnopeuksista [7]. Tarvittavien lähtötietojen laajuus ja suunnitelmien määrä voi vaihdella paikkakunnittain ja paloviranomaisittain. Kuumat palokaasut pyrkivät nousemaan ylöspäin, minkä johdosta savunpoistoluukkujen ideaalinen sijoituspaikka on katolla. Mikäli painovoimainen tuuletus ei riitä poistamaan palokaasuja tarpeeksi tehokkaasti, voidaan savunpoistoluukun yhteyteen asentaa tuuletin lisäämään virtausmääriä.

Standardissa EN12101-2 on esitetty toimintavaatimuksia savunpoistoluukkujen teknisille ominaisuuksille ja koejärjestelyjä kyseisten ominaisuuksien testaamiseen. Suoritettavat testit ovat: aerodynaamisesti vapaan pinta-alan määrittäminen, luotettavuustesti, avautumiskoe kuormitettuna, matalan lämpötilan testi, tuulikuormatesti ja lämmönkestävyyskoe [8].

Kattokuvuilla (kuva 2.2) saadaan tuotua tehokkaasti luonnonvaloa rakennukseen, mikä on yleensä tavoiteltava ominaisuus, kun on kyseessä rakennuksen arkkitehtoninen suunnittelu. Lisäksi luonnonvalon ansiosta tarvittavien valaisimien määrää pienenee, minkä seurauksena myös valaistukseen tarvittava sähköteho pienenee. Kattokuvuilla voidaan myös tapauskohtaisesti hoitaa rakennuksen passiivinen jäähdytys.



**Kuva 2.2.** Esimerkkirakenne kattovalokuvusta.

Kattokupujen teknisiä ominaisuuksia käsittelee standardi EN 1873. Kyseisessä standardissa on esitetty raja-arvoja, laskentakaavoja ja koejärjestelyjä edellä mainittujen raja-arvojen toteamiseen. Tutkittavia teknisiä ominaisuuksia ovat mm. valonläpäisy, iskunkestävyys ja vedenpitävyys [9].

Ennen kuin savunpoistoluukku tai kattokupu voidaan asentaa rakennukseen, on varmistettava sen yhteensopivuus muiden rakenteiden ja taloteknisten järjestelmien kanssa. Läpiviennit ja tarvittava sähköteho on otettava huomioon tehtäessä rakenne- ja sähkösuunnitelmia ja tekemisestä on sovittava erikseen urakoitsijan kanssa. Painovoimaisessa savunpoistossa urakka-asiakirjaan suositellaan sisällytettäväksi seuraavat osiot, joissa otetaan kantaa mainittujen asioiden toteutukseen [6].

- Savunpoistoluukut
- Ohjauskeskukset ja painikkeet
- Ohjemarkinnät ja laukaisukartat
- Luovutusdokumentaatio
- Asennustodistus sisältäen tarkastus- ja koekäyttöpöytäkirjan
- Johdotukset (sähköurakka-asiakirjaan)

Savunpoistoluukut tulee huoltaa säännöllisin väliajoin. Suositeltava huoltoväli on yksi vuosi. Huollon yhteydessä tarkastetaan luukkujen kunto ja testataan savunpoistojärjestelmän toimivuus. Huolto suoritetaan ammattipätevyiden omaavan henkilön toimesta tai tarkastuksen suorittaneen liikkeen allekirjoittaman huoltotodistuksen valtuuttamana. Huollosta tehdään pöytäkirja, johon merkitään huollossa esille tulleet puutteet ja viat [6].

## **3 ENERGIA TEHO KUUTEEN LIITTYVIEN KESKEISTEN SUUREIDEN MÄÄRITYS**

### **3.1 Energiatehokkuus ja U-arvot muissa maissa**

Rakennusten energiatehokkuuteen liittyvät asiat ovat eri tasoilla eri maissa. Joissakin maissa rakentamista ohjataan tarkoilla määräyksillä ja ohjeilla, mikä ilmenee esimerkiksi tarkkoina rakenteita koskevinä toimintavaatimuksina. Toisissa maissa puolestaan ohjeistus on yleispätevää, minkä seurauksena niitä voidaan myös soveltaa eri tavalla. Esimerkiksi Ruotsissa, korkeasta rakennusfysiikan osaamisesta huolimatta, ei ole yhtenäistä standardia rakennusten energiankulutuksen laskemiseksi. Tämän seurauksena energiankulutus voidaan laskea monella eri tavalla ja näin ollen päätyä myös moniin eri lopputuloksiin.

Kun tarkastellaan asiaa savunpoistoluukkujen ja kattokupujen näkökulmasta, on tilanne samanlainen. Joidenkin maiden rakennusmääräyksissä on mainittu selkeitä lämpötekniisiä vaatimuksia, kuten U-arvo, kun taas joissakin maissa ei ole mainittu kyseisistä rakenteista mitään puhuttaessa rakennusten energiatehokkuudesta. Tämä asia käy ilmi esimerkiksi taulukosta 3.1, jossa on tutkittu eri maiden ikkunoiden U-arvomääräyksiä. On toki otettava huomioon, että yleinen trendi energiatehokkuusajattelussa on viemässä ohjeistuksia suuntaan, jossa yksittäisille rakennusosille ei anneta raja-arvoja, vaan keskitytään arvioimaan kokonaisuutta.

Kaikissa tutkituissa lähteissä on kuitenkin mainittu jotain U-arvorajoja ikkunoille. Ikkunoita voidaan pitää jossain määrin rinnastettavissa kattokupuihin ja savunpoistoluukkuihin, koska ne aiheuttavat myös läpiviennin rakenteeseen. Taulukossa 3.1 on esitetty joidenkin maiden U-arvo vaatimuksia ikkunoille.

**Taulukko 3.1. Ikkunoiden sekä kattokupujen U-arvoja eri maista [10]**

Valtio	Ikkunan U-arvo vaatimus [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Huom
Suomi	1,00 (vertailuarvo)	Ehdoton enimmäisarvo lämpimissä tiloissa oleville kattovalokuville ja kupumallisille savunpoistoikkunoille on 2,00 W/(m <sup>2</sup> *K)
Ruotsi	1,30 tai 1,10	U-arvovaatimus riippuu lattian pinta-alasta
Norja	1,20	
Tanska	1,40	Jos huonelämpötila 5...15 °C, U-arvovaatimus 1,5 W/(m <sup>2</sup> *K)
Saksa	1,30	U-arvovaatimus kattoikkunalle 1,40 W/(m <sup>2</sup> *K) ja kaatokuvulle 2,70 W/(m <sup>2</sup> *K)
Itävalta	1,40	U-arvovaatimus kattoikkunalle 1,70 W/(m <sup>2</sup> *K)
Englanti ja Wales	2,00	Koskee myös kattokupuja ja kattoikkunoita
Skotlanti	1,80 (pinta-ala painotettu)	Koskee myös kattokupuja ja kattoikkunoita. Yksittäiselle kattoluukulle 3,30 W/(m <sup>2</sup> *K)
USA	1,99	
Kanada	1,20...1,80	
Japani	2,33	Pohjoisimmilla alueilla
Venäjä	1,25...3,33	

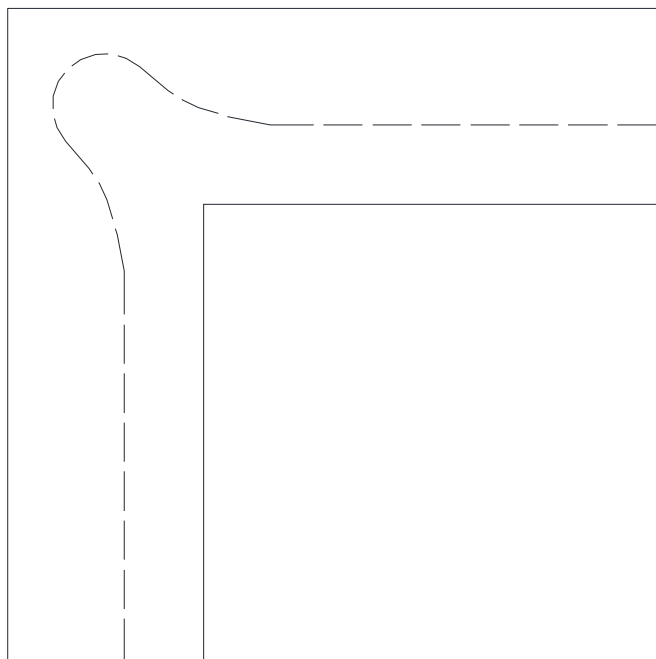
On muistettava, että U-arvot eivät vielä yksittäisinä numeroina anna tietoa rakenteen suunnittelua varten. Jotta rakenteet voidaan suunnitella U-arvo vaatimukset täyttäviksi, on tiedettävä kuinka U-arvo lasketaan ja mitä asioita laskennassa otetaan huomioon. Tärkeässä asemassa on esimerkiksi tieto, miten pinta-aloja määritetään, mikä vaikuttaa U-arvoihin ja viivamaisten lisäkonduktanssien suuruuteen ja näin ollen myös laskennalliseen energiatehokkuuteen.

### 3.2 Liitoksesta aiheutuvan viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäminen

Kylmäsilat ovat pistemäisiä tai viivamaisia kohtia rakenteessa, jossa lämmönjohtavuus poikkeaa merkittävästi muun rakenteen lämmönjohtavuudesta. Viivamaisen kylmäsilan suuruutta voidaan arvioida viivamaisen lisäkonduktanssin avulla, mikä kuvaa kylmäsilan lämmönjohtavuuden suhteellista eroa verrattuna rakenteen tavanomaiseen lämmönjohtavuuteen. Kylmäsiltojen vaikutus rakenteissa näkyy esimerkiksi lämpöhäviöiden kasvamisena tai pinnoilla tapahtuvana kondenssina.

Kylmäsillan suuruutta voidaan arvioida esimerkiksi standardissa EN 10211 esitetyllä tavalla. Kyseisessä standardissa rakennusosa, joka sisältää kylmäsillan, mallinnetaan numeeriseen laskentaohjelmaan, minkä avulla saadaan lämpövirtajakauma rakenteessa tiettyä lämpötilaeroa kohden. Vähentämällä lämpövirtajakaumasta rakennusosan U-arvojen avulla määritetyt lämpöhäviöt, saadaan selville kylmäsillan viivamaisen lisäkonduktanssin suuruus [11].

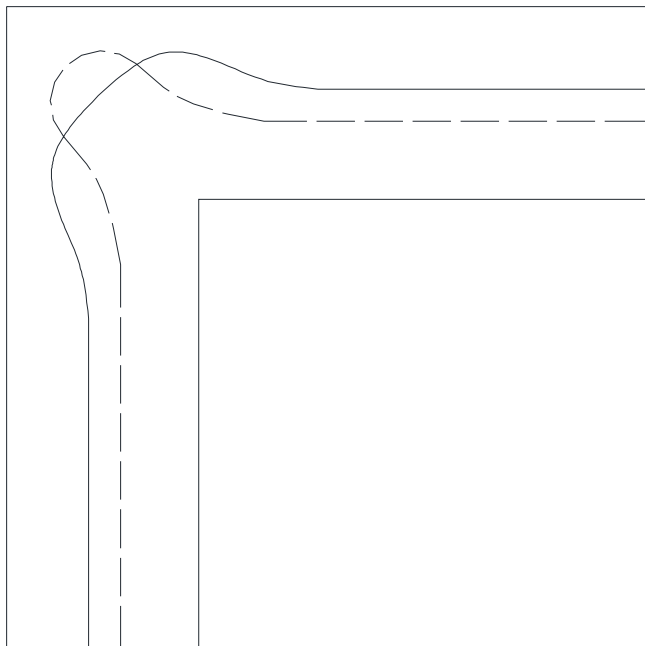
Tarkastellaan seuraavaksi kuvan 3.1 mukaista nurkkaliitosta, joka koostuu kahdesta samanlaisesta yksiaineisesta seinästä.



**Kuva 3.1.** Nurkkaliitos, jossa esitetty periaatteellisella tasolla lämpövirran tiheyden jakauma.

Kylmäsillan suuruus saadaan vähentämällä numeerisen laskennan avulla saadusta lämpövirran tiheydestä seinien läpi tapahtuva lämpöhäviö. Seinien mittoina voidaan käyttää joko sisä- tai ulkomittoja, mikä vaikuttaa kylmäsillan suuruuteen. Valitusta mittajärjestelmästä tulee pitää kiinni koko laskennan ajan, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Myös liitoksessa liittyvien rakennusosien U-arvot vaikuttavat rakenteen kylmäsiltaan, kuten kuvassa 3.2 on esitetty.

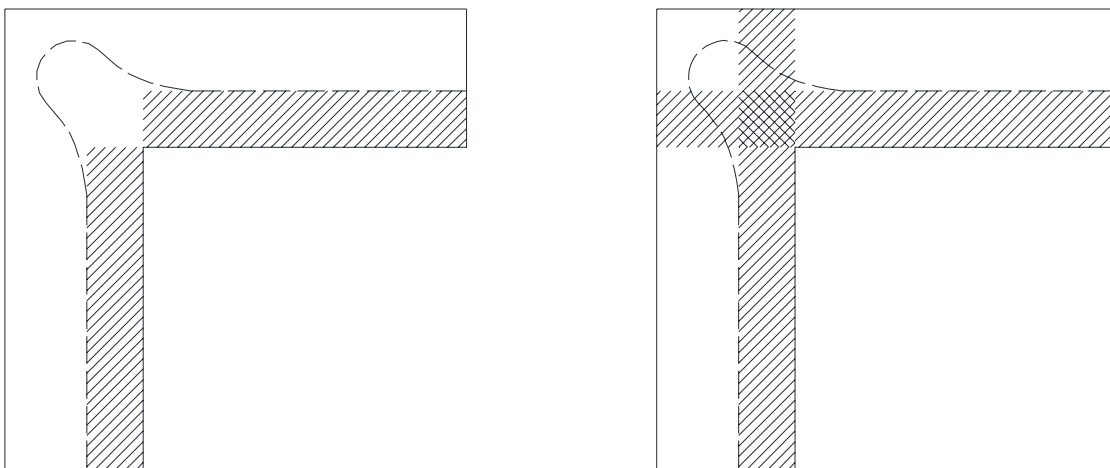




**Kuva 3.2.** Nurkkaliitos, jossa esitetty periaatteellisella tasolla lämpövirran tiheyden jakaumat kahdella eri  $U$ -arvo tasolla.

Kuvan lämpövirtajakaumat ovat kuvitteellisia, mutta periaate niistä kuitenkin selviää. Lämpövirta ei käytännön raketeissa, kuten ei 2D malleissakaan, ole yleensä yksiulotteista vaan lämpövirta kulkee lämpötilagradientin suuntaisesti. Rakenteiden  $U$ -arvosta riippuen, voi tulla eteen tilanne, jossa kylmempi kohta ei löydykään suoraviivaisesti sisältä ulospäin mentäessä, vaan esimerkiksi tarkastelukohdan sivusta. Tämän seurauksena lämpövirran tiheyden jakauma vaihtelee  $U$ -arvosta riippuen, mikä puolestaan vaikuttaa liitoksen viivamaisen lisäkonduktanssin lukuarvoon.

Kuten aiemmin todettiin, viivamaisen lisäkonduktanssin lukuarvoa määritettäessä voidaan käyttää joko rakenteiden sisä- tai ulkomittoja. Kuvassa 3.3 on havainnollistettu molemmat tapaukset esimerkkirakenteelle.



**Kuva 3.3.** Esimerkki kuva viivamaisen lisäkonduktanssin määrittämisestä. Vinoviivoitus kuvaa 1D-rakenteen  $U$ -arvon vaikutusta lämpövirran tiheyteen. Vasemmanpuoleisessa liitoksessa käytetään rakenteen sisämittoja ja oikeanpuoleisessa liitoksessa rakenteen ulkomittoja.

Kuvan vasemmassa laidassa liitoksen kylmäsilan arvioinnissa on käytetty rakenteen sisämittoja. Kuvasta voidaan havaita, että tässä tilanteessa kylmäsilan arvoksi saadaan positiivinen luku, koska seinien  $U$ -arvojen vaikutusten (vinoviivoitus) vähentämisen jälkeen katkoviivoilla rajoitetusta alueesta (lämpövirran tiheyden jakauma) nettolämpövirrantiheys on positiivinen. Jos puolestaan käytetään rakenteen ulkomittoja (kuvan oikea laita) huomataan, että liitoksen viivamaisen lisäkonduktanssin lukuarvo muuttuu negatiiviseksi, koska lämpövirran tiheyden nettoarvo menee negatiiviseksi.

Eri maissa on annettu maakohtaisia ohjeita pinta-alojen määrittästä varten. Ulkomittoja käytetään esimerkiksi Saksassa ja Belgiassa. Sisämittoja käytetään puolestaan Suomessa ja Norjassa [12, s.10].

Kappaleessa 3 käy esille että kylmäsilat vaikuttavat savunpoistoluukun ja kattokuvun laskennalliseen  $U$ -arvoon. Näin ollen on tärkeää, että tulosta ilmoitettaessa kerrotaan, mitä pintoja laskennassa on käytetty. On huomattava, että pinta-alojen määrittämisellä ei ole merkitystä kun kylmäsiltoja käytetään energialaskennassa, kunhan pidetään pinta-ala valinnasta kiinni.

## 4 SAVUNPOISTOLUUKKUIEN JA KATTOVALOKUPEIN U-ARVON LASKENTA STANDARDIN EN 1873 MUKAAN

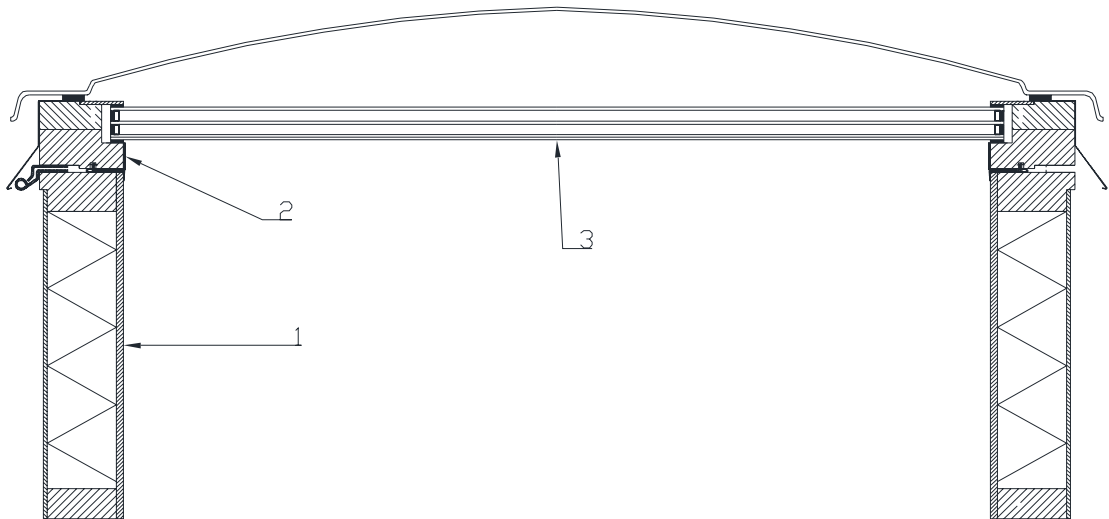
Standardi EN 1873 käsittelee kattovalokupua. Siinä esitellään kyseisistä tuotteista testattavia ominaisuuksia ja koejärjestelyjä kyseisten ominaisuuksien testaamiseksi. Standardissa on mainittu muun muassa seuraavia ominaisuuksia:

- Säteilynläpäisyominaisuudet
- Mekaaninen kestävyys
- Pitkäaikaiskestävyys
- Vesitiiviys
- Mekaaninen suorituskyyky
- Palonkestävyys
- Ilmanläpäisevyys
- Ilmäänen eristävyys
- Lämmönvastus

Tässä työssä tarkastellaan savunpoistoluukujen lämmönvaston ja U-arvon määrittämistä kyseisen standardin mukaan. Standardi EN 1873 ei suoranaisesti esitä mitään uutta laskentamenetelmää U-arvon laskemiseksi, vaan opastaa dimensioiden määrittämisessä ja laskennassa huomioon otettavissa asioissa. Varsinaiset laskentamenetelmät ja -kaavat on esitetty toisissa standardeissa, joihin standardi EN 1873 viittaa.

### 4.1 Laskennan periaate

U-arvoa määrittäessä kattokupu tai savunpoistoluukku jaetaan pääsääntöisesti kolmeen osaan: jalustaan (1), reunaprofiiliin (2) ja kupu- tai kansiosaan (3), kuten kuvassa 4.1 on esitetty.



**Kuva 4.1.** Esimerkkikuva kattovalokuvun rakenteista

Kattokuvun U-arvo muodostuu näiden kolmen komponentin vaikutuksesta ja liitosten välisistä kylmäsilloista kuten kaavassa 3.1 on esitetty.

$$U_{rc} = \frac{A_{up}U_{up} + A_eU_e + A_tU_t + l_e\psi_e + l_t\psi_t}{A_{up} + A_e + A_t} \quad (3.1)$$

missä,

$A_{up}$	on	jalustan pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$U_{up}$	on	jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]
$A_e$	on	liitoskohdan profiilin pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$U_e$	on	liitoskohdan profiilin U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]
$A_t$	on	kansiosan pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$U_t$	on	kansiosan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]
$l_e$	on	liitoskohdan ja jalustan välisen kylmäsillan pituus [m]
$\psi_e$	on	liitoskohdan ja jalustan välinen viivamainen lisäkonduktanssi [W/(m <sup>2</sup> *K)]
$l_t$	on	liitoskohdan ja kansiosan välisen kylmäsillan pituus [m]
$\psi_t$	on	liitoskohdan ja kansiosan välinen viivamainen lisäkonduktanssi [W/(m <sup>2</sup> *K)]

Vaihtoehtoinen tapa määrittää kattokuvun U-arvo on laskea liitosprofiilin U-arvo mukaan jalustan U-arvoon. Näin ollen kattovalokuvun U-arvon laskentakaavasta voidaan jättää pois profiilin ja jalustaan välinen kylmäsilta, koska sen vaikutus on mukana jalustan ja profiilin yhteenlasketussa U-arvossa. Tämän seurauksena kaava 3.1 muuttuu kaavaksi 3.2.

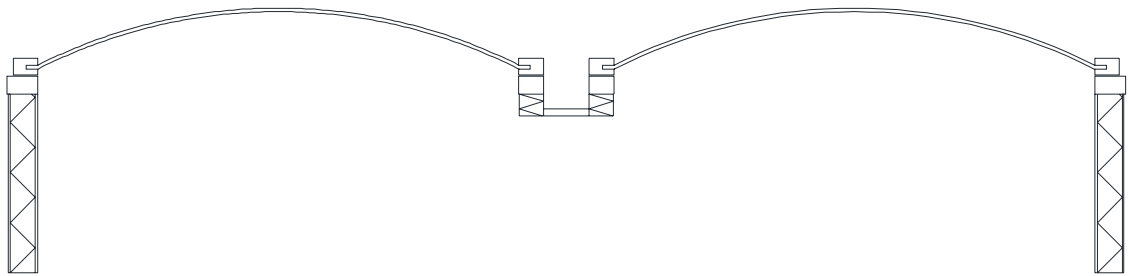
$$U_{rc} = \frac{(A_{up} + A_e)U_{up,e} + A_t U_t + l_t \psi_t}{A_{up} + A_e + A_t} \quad (3.2)$$

missä,

$U_{up,e}$  on jalustan ja liitoskohdan profiilin yhteinen U-arvo [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

Standardissa on mainittu lisäksi tapaus, jossa ei ole jalustaa lainkaan, jolloin termit  $U_{up}$ ,  $A_{up}$ ,  $\psi_e$  ja  $l_e$  jäävät pois kaavoista 3.1 ja 3.2. Käytännön rakenteissa kuitenkin käytetään useasti jalustaa helpottamaan liitoksen tekoa katon ja kattokuvun välille ja varmistamaan liitoksen vedenpitävyys.

Standardissa on esitetty myös tapaus, jossa kattokupu muodostuu useasta kansiosasta ja niiden välissä olevasta liitososasta kuten kuvassa 4.2 on esitetty



**Kuva 4.2.** Esimerkkikuva kattovalokuvusta, joka muodostuu useammasta kansiosasta.

Useammasta kansiosasta muodostuneen kattovalokuvun U-arvolaskenta ei poikkea muista tapauksista vaan kaavaan 3.2 lisätään mukaan kupujen liitos-osien U-arvot ja liitososien ja kupujen väliset viivamaiset lisäkonduktanssit. Useammasta kansiosasta muodostuneen kattovalokuvun U-arvo lasketaan kaavalla 3.3.

$$U_{rc} = \frac{(A_{up} + A_e)U_{up,e} + \sum A_t U_t + \sum A_j U_j + \sum l_t \psi_t + \sum l_j \psi_j}{A_{up} + A_e + \sum A_t + \sum A_j} \quad (3.3)$$

missä,

$A_j$	on	yhden liitoskohdan pinta-ala [ $m^2$ ]
$U_j$	on	yhden liitoskohdan U-arvo [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
$l_j$	on	liitoskohdan kylmäsilän pituus [m]
$\psi_j$	on	liitoskohdan kylmäsilän viivamainen lisäkonduktanssi [ $W/(m \cdot K)$ ]

U-arvon laskennassa katon ja jalustan välinen rajapinta oletetaan adiabaattiseksi ja pinta-alat lasketaan rakenteiden ulkomittojen mukaan. Myös kupuosan U-arvoa laskettaessa voidaan käyttää kuvun ulkopinnan pinta-alaa. Pinta-alojen määrittäminen on esitetty tarkemmin myöhemmissä kappaleissa.

## 4.2 Jalustan ja läpinäkyvän kansiluukun U-arvon laskenta standardin EN ISO 6946 mukaan

Jalustan ja läpinäkyvän kansiluukun U-arvo, eli lämmönläpäisykerroin, lasketaan standardin EN ISO 6946 mukaan niin sanotulla yläraja-alaraja menetelyllä. Kyseisellä menetelyllä pyritään ottamaan huomioon ilmasta-ilmaan rajoittuvissa rakenteissa olevat epähomogeeniset rakennekerrokset, minkä johdosta lämpövirta rakenteen läpi ei ole tasaista. Standardi SFS EN ISO 6946 rajaa menetelmän käyttöaluetta niin, että sitä ei voida käyttää, jos ylä- ja alaraja-arvon suhde on yli 1,5 tai jos metallirakenne läpäisee lämmöneristekerroksen [13, s. 11]. Yläraja- alaraja menetelmällä saatuun U-arvoon lisätään vielä korjauskertoimet, mikäli niiden vaikutus on yli 3 % alkuperäisestä lämmönläpäisykertoimesta.

### 4.2.1 Lämmönvastus ja lämmönvastuksen ylä- ja alaraja-arvo

Lämmönvastus (R) kuvaa rakenteen lämmöneristyskykyä. Mitä suurempi lämmönvastus on, sitä pienempi on lämpövirta rakenteen läpi lämpötilaeroa kohden. Yksiaineisen materiaalikerroksen lämmönvastuksen suuruuteen vaikuttaa materiaalikerroksen paksuus ja lämmönjohtavuus, kuten kaavassa 4.4 on esitetty

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (4.4)$$

missä,

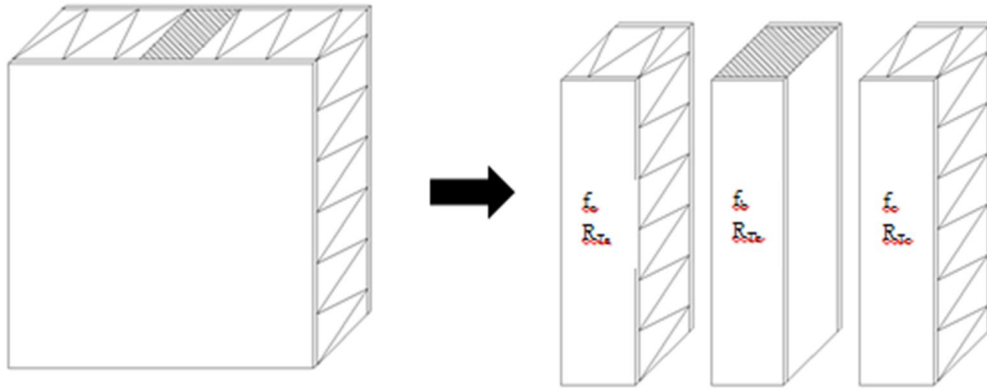
d	on	materiaalikerroksen paksuus [m]
$\lambda$	on	materiaalin lämmönjohtavuus [W/(m*K)]

Monikerroksisen rakenteen lämmönvastus on pintavastusten ja kunkin rakennekerroksen lämmönvastusten summa. Lämmönvastusta laskettaessa materiaalien lämmönjohtavuuksina tulee käyttää lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa ( $\lambda_U$ ), joka on määritetty standardin SFS-EN ISO 10456 mukaan [13, s.7]. Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvossa on otettu huomioon materiaalin vanhenemisen, kosteusolosuhteiden ja käyttölämpötilan vaikutus materiaalin lämmönjohtavuuteen [14].

Laskettaessa rakenteen lämmönvastusta yläraja – alaraja menetelmällä tarkastellaan rakenteen osaa, joka edustaa koko rakennetta. Toisin sanoen tarkasteltava alue on valit-

tava niin, että se ottaa huomioon kaikki rakenteessa olevat säännölliset kylmäsiilat ja epähomogeeniset rakennekerrokset.

Yläraja-arvoa ( $R'_T$ ) laskettaessa rakenne jaetaan osa-alueisiin, joista kukin osa-alue muodostuu homogeenisistä rakennekerroksista, kuten kuvassa 4.3 on esitetty. Osa-alueitten lukumäärä määräytyy rakenteen mukaan, niin että kaikki epähomogeeniset osa-alueet tulevat erotelluiksi homogeenisiksi osa-alueiksi.



**Kuva 4.3.** Esimerkkikuva, jossa rakenne on jaettu osa-alueisiin, joista kukin koostuu homogeenisistä rakennekerroksista. Kuvassa esitetyn osa-aluejaon avulla voidaan laskea rakenteen yläraja-arvo.

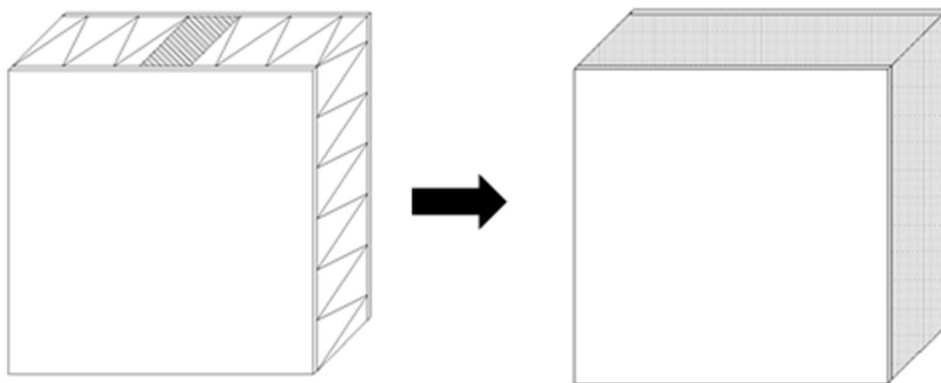
Jokaiselle osa-alueelle lasketaan oma lämmönvastus, minkä jälkeen koko rakenteen ylälikiarvo saadaan painottamalla osa-alueitten lämmönvastuksia osa-alueen pinta-alalla. Ylälikiarvo lasketaan kaavalla 4.5.

$$R'_T = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \frac{f_c}{R_{Tc}} \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}}} \quad (4.5)$$

missä,

f	on	osa-alueen suhteellinen pinta-ala [-]
R	on	osa-alueen lämmönvastus [(m <sup>2</sup> *K)/W]

Alaraja-arvoa ( $R''_T$ ) laskettaessa tarkastellaan rakennusosaa kerroksellisenä rakenteena, kuten kuvassa 4.4 on esitetty. Epähomogeeniset rakennekerrokset muutetaan homogeenisiksi painottamalla eri materiaalien lämmönvastusta materiaalin suhteellisella pinta-alalla, kaavassa 4.5 esitetyllä tavalla. Tämän jälkeen lasketaan homogeenisistä rakennekerroksista koostuvan koko rakennusosan lämmönvastus kaavalla 4.6.



**Kuva 4.4.** Esimerkkikuva, jossa rakenteen keskellä kulkeva puu ja lämmöneriste on muutettu homogeeniseksi rakennekerrokseksi painottamalla kummankin lämmönjohtavuutta kyseisen materiaalin pinta-alalla.

$$R_T'' = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 \dots + R_n + R_{se} \quad (4.6)$$

missä,

$R_{si}$	on	sisäpinnan pintavastus $[(m^2 \cdot K)/W]$
$R_{1...n}$	on	kyseisen rakennekerroksen lämmönvastus $[(m^2 \cdot K)/W]$
$R_{se}$	on	ulkopinnan pintavastus $[(m^2 \cdot K)/W]$

Rakenteen lämmönvastus ( $R_T$ ) on ylä- ja alarajan keskiarvo. Ennen kuin laskettua lämmönvastuksen arvoa voidaan käyttää rakenteelle, pitää tarkastaa suhteellinen virhe ( $e$ ), jonka avulla voidaan tutkia laskentamenetelmän soveltuvuutta rakenteen lämmönvastuksen laskentaan. Suhteellinen virhe lasketaan kaavalla 4.7.

$$e = \frac{R_T' - R_T''}{2R_T} 100\% \quad (4.7)$$

Suhteellisen virheen ollessa 20 % on ylärajan ja alarajan välinen suhde 1,5 [13, s. 11], mikä tarkoittaa, että kyseistä menetelmää ei voida käyttää lämmönvastuksen laskemiseen. Vaihtoehtoinen tapa määrittää rakenteen lämmönvastus on käyttää hyväksi numeerisia ratkaisumenetelmiä, joiden käyttöä on ohjeistettu standardeissa EN ISO 10077-2 ja EN ISO 10211 [13, s. 11].

#### 4.2.2 Korjaustermit

Kun ilmoitetaan rakenteen korjattu U-arvo ( $U_c$ ), jota käytetään lähtötietona esimerkiksi E-luvun laskennassa, pitää U-arvoon tarvittaessa lisätä korjaustermien vaikutus. Korjaustermeillä otetaan huomioon rakenteessa olevat epäsäännöllisyydet jotka aiheuttavat muutosta rakenteen U-arvoon ja joita ei ole huomioitu lämmönvastuksen yläraja - alara-



jalaskennassa. Kyseisiä korjaustermejä ovat: ilmarakojen korjaustermi, mekaanisten kiinnikkeiden korjaustermi ja käännettyjen kattojen korjaustermi

## Ilmaraot

Ilmaraot lämmöneristekerroksessa aiheuttavat lämpöhäviöitä rakennukseen. Niiden seurauksena lämmöneristeen läpi siirtyvä lämpövirta konvektiolla ja säteilemällä kasvavat. Ilmarakojen määrän vaikuttaa työmaateknikka, rakenneratkaisut, lämmöneristeiden sijoitus, lämmöneristeiden laatu ja mittapoikkeamat.

Ilmarakojen korjaustermi  $\Delta U_g$  koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen kerroin  $\Delta U''$  huomioi rakenteen toteutukseen liittyviä näkökulmia.  $\Delta U''$  voi saada arvot 0; 0,01 tai 0,04 W/(m<sup>2</sup>\*K).

Jos käytetään  $\Delta U''$  - arvoa 0 W/(m<sup>2</sup>\*K), oletetaan että lämmöneristekerroksessa ei ole rakoja. Tämä edellyttää, että lämmöneristys on tehty useammasta eri kerroksesta ja kerrokset on sijoitettu siten että lämmöneristeiden saumat limittyvät tai lämmöneristeiden saumat on pontattu. Lisäksi muut rakenneosat pitää olla sijoitettuna niin, etteivät ne lävistä lämmöneristekerrosta. Edellä mainittua tasoa voidaan käyttää myös, jos eristeiden mittapysyvyys on  $\leq 1,0$  % standardin SFS EN ISO 1604 [15, s. 27] mukaisesti todettuna ja rakenteeseen ei pääse syntymään yli 5 mm paksuja ilmarakoja. Jos ehdot täyttyvät, lämmöneristys voidaan toteuttaa yhtenä kerroksena puskusaumoin [13, s. 28].

$\Delta U''$  - arvoa 0,01 W/(m<sup>2</sup>\*K) käytetään kun rakenteessa on rakoja, mutta ilma ei niissä pääse kiertämään lämmöneristeen kylmältä puolelta lämmöneristeen lämpimälle puolelle. Tyypillinen tapaus on puurunkoinen seinä jossa lämmöneristeet on asennettu yhteen kerrokseen runkotalppien väliin [13, s. 28].

$\Delta U''$  saa arvon 0,04 W/(m<sup>2</sup>\*K) kun rakenteessa olevat raot ovat niin suuria, että ilma pääsee kiertämään lämmöneristeen lämpimältä puolelta lämmöneristeen kylmälle puolelle [13, s. 27].

Toinen osa korjaustermistä muodostuu lämmöneristekerroksen lämmönvastuksen suhteellisesta osuudesta koko rakenteen lämmönvastukseen. Tässä tapauksessa rakenteen lämmönvastusta laskettaessa ei oteta huomioon kylmäsiltoja.

Lopullinen korjaustermi lasketaan kaavalla 4.8. Se koostuu vakiotermin ja lämmönvastusten suhteen tulosta.

$$\Delta U_g = \Delta U'' \left( \frac{R_1}{R_{T,h}} \right)^2 \quad (4.8)$$

missä,

$\Delta U''$	on	taulukoitu alalikiarvo korjaustermille $[W/(m^2 \cdot K)]$
$R_1$	on	ilmarakoja sisältävän kerroksen lämmönvastus $[(m^2 \cdot K)/W]$
$R_{T,h}$	on	rakennusosan kokonaislämmönvastus, jossa ei oteta huomioon kylmäsiltojen vaikutusta $[(m^2 \cdot K)/W]$

### Mekaaniset kiinnikkeet

Mekaaniset kiinnikkeet ovat rakennustarvikkeita joiden pääsääntöinen tehtävä on rakennusosien kiinnitys ja ankkurointi. U-arvon laskennassa kyseisellä termillä voidaan ottaa huomioon myös muut säännölliset pistemäiset kylmäsilat rakenteessa. Mikäli rakenteessa esiintyy yksittäisiä kylmäsiltoja, kuten läpiviennit parvekekannakkeet hormit, niitä ei tarvitse ottaa huomioon [16, s. 10]. Mekaanisten kiinnikkeiden aiheuttama lisäkonduktanssi otetaan huomioon korjaustermillä  $\Delta U_f$ , joka lasketaan kaavalla 4.9.

Termissä on tekijöinä kiinnikkeen lämmönjohtavuus, kiinnikkeiden lukumäärä neliömetriä kohden, kiinnikkeen poikkipinta-ala, kiinnikkeen läpäisemän eristekerroksen paksuus, eristekerroksen lämmönvastus sekä rakennusosan lämmönvastus.

Tämän lisäksi korjaustermiin vaikuttaa kerroin  $\alpha$ . Kerroin määräytyy sen mukaan läpäisekö kiinnike eristekerroksen kokonaan vai osittain. Mikäli kiinnike lävistää lämmöneristyskerroksen kokonaan  $\alpha = 0,8$ . Jos kiinnike lävistää lämmöneristeen vain osittain,  $\alpha$  on 0,8 painotettuna kiinnikkeen läpäisyviteuden suhteella lämmöneristeen paksuuteen.

Korjaustermiä ei tarvitse käyttää mikäli kiinnike lävistää eristeiden välisen ilmatilan tai jos kiinnikkeen lämmönjohtavuus on alle  $1 W/(m \cdot K)$ . Korjaustermiä ei saa käyttää tapauksessa, jossa kiinnike yhdistää kaksi metallilevyä [13, s. 30].

$$\Delta U_f = \alpha \frac{\lambda_f A_f n_f}{d_0} \left( \frac{R_1}{R_{T,h}} \right)^2 \quad (4.9)$$

missä,

$\alpha$	on	kerroin [-], joka on: 0,8 jos kiinnike läpäisee koko lämmöneristekerroksen ja $0,8 \cdot d_1/d_0$ jos kiinnike läpäisee lämmöneristekerroksen osittain
$d_1$	on	kiinnikkeen pituus [m]
$d_0$	on	lämmöneristeen paksuus [m]
$\lambda_f$	on	kiinnikkeen lämmönjohtavuus $[W/(m \cdot K)]$
$A_f$	on	yhden kiinnikkeen poikkipinta-ala $[m^2]$

$n_f$  on kiinnikkeiden lukumäärä neliömetrillä [kpl/m<sup>2</sup>]

### Käännetyt katot

Käännetty katto on rakenne, jossa yläpohjan vedeneristys on sijoitettu lämmöneristeiden alapuolelle. Kyseisellä rakenneratkaisulla pyritään estämään vedeneristysten mekaaninen vaurioituminen. Tämä kuitenkin johtaa siihen, että vesi pääsee virtaamaan vapaasti lämmöneristekerroksen kylmältä puolelta lämmöneristekerroksen lämpimälle puolelle, mikä heikentää rakenteen lämmönvastusta. Vaikutukset U-arvoon otetaan huomioon korjaustermillä  $\Delta U_r$ , joka lasketaan kaavalla 4.10. Termi koostuu kolmesta kertoimesta sekä lämmöneristekerroksen lämmönvastuksen suhteesta koko rakennusosan lämmönvastukseen.

Kerroin  $p$  kuvaa sateen keskimääräistä intensiteettiä lämmityskauden aikana. Tämä tieto saadaan paikkakuntaisilta sääasemilta tai kansallisista määräyksistä. Korjauskerroin  $f$ , kuvaa sateen intensiteetin osuutta, joka pääsee kulkeutumaan lämmöneristeen ja vedeneristeen väliin. Kerroin  $x$  kuvaa lämpö häviötä, joka aiheutuu sadeveden kulkeutumisesta lämmöneristekerroksessa. RIL 225 on esitetty ohjeita kerroin yhdistelmän  $f \cdot x$  määrittämiseksi. Neljäs tulontekijä korjauskertoimessa on lämmöneristeen lämmönvastuksen suhde koko rakenteen lämmönvastukseen, jossa ei ole huomioitu korjauskertoimia.

$$\Delta U_r = p f x \left( \frac{R_1}{R_T} \right)^2 \quad (4.10)$$

missä,

$p$	on	lämmityskauden keskimääräinen sateen intensiteetti [mm/vrk]
$f$	on	kerroin, joka kuvaa $p$ tunkeutumista lämmöneristeen ja vedeneristeen väliin [-]
$x$	on	kerroin, joka kuvaa sadeveden kulkeutumisesta vedeneristysten ja lämmöneristeen väliin kasvanutta lämpöhäviötä [(W*vrk)/(m <sup>2</sup> *K*mm)]
$R_T$	on	rakenteen kokonaislämmönvastus ennen tämän kohdan mukaista korjausta [(m <sup>2</sup> *K)/W]

### 4.2.3 U-arvo ja korjattu U-arvo

Rakenteen U-arvo on lämmönvastuksen käänteisluku, kuten kaavassa 4.11 on esitetty. U-arvo, eli lämmönläpäisykerroin, kuvaa rakenteen läpi johtumalla siirtyvää lämpöenergiaa aikayksikköä, pinta-alayksikköä ja lämpötilaeroa kohden. U-arvo esitetään

kahden desimaalin tarkkuudella ja se pyöristetään normaaleiden matemaattisten pyöristyssääntöjen mukaan.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (4.11)$$

Kun ilmoitetaan rakenteen U-arvo, on sitä ennen tarkasteltava korjaustermien vaikutusta rakenteen U-arvoon. Aluksi korjaustermit lasketaan yhteen kuten, kaavassa 4.12 on esitetty. Kaikissa rakenteissa ei ole välttämättä perustetta jokaiselle korjaustermille, jolloin epäoleellisen korjaustermien arvo on 0.

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (4.12)$$

Tämän jälkeen korjaustermien summaa verrataan U-arvoon, kuten kaavassa 4.13 on esitetty. Jos korjaustermien osuus alkuperäisestä U-arvosta on alle 3 %, sitä ei tarvitse ottaa huomioon ja mikäli se on yli 3 %, lisätään sen vaikutus alkuperäiseen U-arvoon.

$$U_c = \begin{cases} U + \Delta U, jos \frac{\Delta U}{U} 100\% \geq 3\% \\ U, jos \frac{\Delta U}{U} 100\% < 3\% \end{cases} \quad (4.13)$$

### 4.3 Läpinäkyvän kansiluukun U-arvon laskenta standardin EN 673 mukaan

Läpinäkyvän kansiluukun U-arvo lasketaan standardin EN 673 mukaan. Kyseinen standardi soveltuu lasien ja lasintapaisten tuotteiden sekä monikerroksisten lasien U-arvon laskentaan. Standardia ei voi käyttää lasiin, tai lasintapaisiin tuotteisiin, joissa kerrosten välissä olevissa tiloissa on paljon infrapunasäteilyä estävä kaasu tai pinnoite [17 s. 4].

Läpinäkyvän kansiluukun U-arvo muodostuu pintojen lämmönsiirtokerroimista ja lasi osan lämmönsiirto kertoimesta, kuten kaavassa 4.14 on esitetty.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i}} \quad (4.14)$$

missä,

$h_e$	on	ulkopinnan lämmönsiirtokerroin [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
$h_t$	on	läpinäkyvän osan lämmönsiirtokerroin [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

$h_i$  on sisäpinnan lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]

Monikerroksisissa lasirakenteissa lasiosan lämmönsiirtokerroin muodostuu lasin lämmönsiirtokertoimesta ja lasiosien välisten tilojen lämmönsiirtokertoimesta, kuten kaavassa 4.15 on esitetty.

$$h_t = \frac{1}{\sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j r_j} \quad (4.15)$$

missä,

$h_s$  on kahden lasikerroksen välisen tilan lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]  
 $d_j$  on yhden lasikerroksen paksuus [m]  
 $r_j$  on yhden lasikerroksen terminen ominaisresistanssi [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ], lämmönjohtavuuden käänteisluku  
 $N$  on lasikerrosten välisten tilojen lukumäärä  
 $M$  on lasikerrosten lukumäärä

Lasikerrosten välisissä tiloissa merkittävä osuus lämmönsiirrosta tapahtuu johtumisen lisäksi säteilemällä. Lasikerrosten välisen tilan lämmönsiirtokerroin onkin edellä mainittujen kahden lämmönsiirtokomponentin summa, kuten kaavassa 4.16 on esitetty.

$$h_s = h_r + h_g \quad (4.16)$$

missä,

$h_r$  on säteilyn lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]  
 $h_g$  on johtumisen lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]

Säteilyllä siirtyvä lämpöenergia noudattaa Stefan-Boltzmannin lakia. Kyseisen lain mukaan kahden kappaleen välinen lämpösäteilyintensiteetin tase on suoraan verrannollinen kappaleiden pintalämpötilojen neljänteen potenssiin ja kappaleiden pintojen emissiivisyyksiin. Edellä mainittuun lakiin nojautuen säteilyn lämmönsiirtokerroin lasipinojen väliin jäävälle alueelle lasketaan kaavalla 4.17.

$$h_r = \frac{4\sigma T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4.17)$$

missä,

$T_m$	on	kahden lasikerroksen välisen tilan lämpötila [K], käytetään arvoa 283 K
$\varepsilon_1$	on	pinnan 1 korjattu emissiivisyys [-]
$\varepsilon_2$	on	pinnan 2 korjattu emissiivisyys [-]

Pinnan korjattu emissiivisyys määritetään standardin EN 12898 mukaisella koejärjestelyllä [17, s. 9].

Lasipintojen rajaamassa välissä tapahtuva johtuminen lasketaan Nusseltin luvun avulla. Nusseltin luku on dimensioton luku, jota käytetään pääsääntöisesti virtaustekniikassa. Sen avulla voidaan tarkastella konvektiolla ja johtumalla tapahtuvan lämmönsiirron suuruutta. On oletettavaa, että lasipintojen väliin rajoittuvassa alueessa luonnollinen konvektio vaikuttaa olennaisesti lämmönjohtumiseen, mikä on otettava huomioon Nusseltin luvun avulla. Mikäli lämpövirta on ylhäältä alaspäin, on Nusseltin luku 1, mikä johtuu siitä, että luonnollista konvektiota ei pääse tapahtumaan mikäli lämmin ilma on jo alkuperäisestikin ylempänä kuin kylmä ilma. Raossa tapahtuva lämmönjohtuminen lasketaan kaavalla 4.18

$$h_g = Nu \frac{\lambda}{s} \quad (4.18)$$

missä,

$Nu$	on	Nusseltin luku [-]
$\lambda$	on	kaasun lämmönjohtavuus [W/(m*K)]
$s$	on	kahden lasikerroksen välisen tilan paksuus [m]

Standardissa EN 673 Nusseltin luku on määritelty kahden muun dimensiottoman suureen tulona, Grashofin ja Prandtin lukujen avulla, kuten kaavassa 4.19 on esitetty

$$Nu = A(Gr \cdot Pr)^n \quad (4.19)$$

missä,

$A$	on	kerroin [-], joka on pystysuorille pinnoille 0,035, vaakasuorille pinnoille 0,16 ja 45° kulmassa oleville pinnoille 0,10
$Gr$	on	Grashofin luku [-]
$Pr$	on	Prandtin luku [-]
$n$	on	eksponentti [-], joka on pystysuorille pinnoille 0,38, vaakasuorille pinnoille 0,28 ja 45° kulmassa oleville pinnoille 0,31

Grashofin luku kuvaa massan liikettä, joka johtuu lämpötilan muutosten aiheuttamista tiheyseroista. Osoittajassa Grashofin luvussa on väliaineen nosteesta aiheutuva voima ja nimittäjässä väliaineen viskositeetistä aiheutuva voima, joka pyrkii vastustamaan nosteen voimasta aiheutuvaa liikettä [18]. Grashofin luku lasketaan kaavalla 4.20

$$Gr = \frac{gs^3\Delta T\rho^2}{T_m\mu^2} \quad (4.20)$$

missä,

$g$	on	putoamiskiihtyvyys, 9,81 [m/s <sup>2</sup> ]
$s$	on	kahden lasikerroksen välisen tilan paksuus [m]
$\Delta T$	on	lasikerrosten pintojen välinen lämpötila ero [K], käytetään arvoa 15 K
$\rho$	on	kahden lasikerroksen välissä olevan aineen tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$T_m$	on	kahden lasikerroksen välisen tilan lämpötila [K], käytetään arvoa 283 K
$\mu$	on	kahden lasikerroksen välissä olevan aineen dynaaminen viskositeetti [kg/(m*s)]

Prandtin luku yhdistää sekä lämmön- että massansiirron yhdistämällä kaksi erillistä suuretta: termisen diffusiviteetin ja dynaamisen viskositeetin. Terminen diffusiviteetti kuvaa kaasussa tapahtuvien lämpötilamuutosten tasaantumismuutosta ja dynaaminen viskositeetti kuvaa kuinka massavirran liikemäärä tasoittuu kaasussa [19, s. 53]. Prandtin luku lasketaan kaavalla 4.21

$$Pr = \frac{\mu c}{\lambda} \quad (4.21)$$

missä,

$c$	on	kahden lasikerroksen välissä olevan aineen ominaislämpökapasiteetti [J/(kg*K)]
$\lambda$	on	kahden lasikerroksen välissä olevan aineen lämmönjohtavuus [W/(m*K)]

Läpinäkyvän osan pintojen pintavastuksiin vaikuttaa konvektio ja säteily. Ulkopinnan olosuhteita ei yleensä tunneta riittävällä tarkkuudella, jolloin niiden vaikutusta ulkopinnan pintavastukseen on hankalaa arvioida. Pintavastusten arvoja on esitetty standardissa EN 6946. Tavanomainen pintavastus ulkopinnalle on 0,04 (m<sup>2</sup>\*K)/W, näin ollen tavanomainen lämmönsiirtokerroin ulkopinnalle on 25 W/(m<sup>2</sup>\*K)

Sisäpinnan olosuhteita pystytään kontrolloimaan paremmin kuin ulkopinnan olosuhteita. Näin ollen säteilyn ja konvektion vaikutusta voidaan arvioida tarkemmin kuin ulkopinnassa. Sisäpuolen lämmönsiirtokerroin on esitetty kaavassa 4.22 ja se muodostuu säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokertoimista.

$$h_i = h_{r,i} + h_{c,i} \quad (4.22)$$

missä,

$h_{r,i}$	on	sisäpinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]
$h_{c,i}$	on	sisäpinnan konvektion lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ], luonnolliselle konvektiolle käytetään arvoa $3,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Mikäli sisäpinnassa on matalaemissiviteetti pinnoite, otetaan sen vaikutus huomioon kaavalla 4.23, jossa lukuarvo 0,873 on normaali natronkalkkilasin emissiviteetti.

$$h_{r,i} = \frac{4,1\varepsilon}{0,873} \quad (4.23)$$

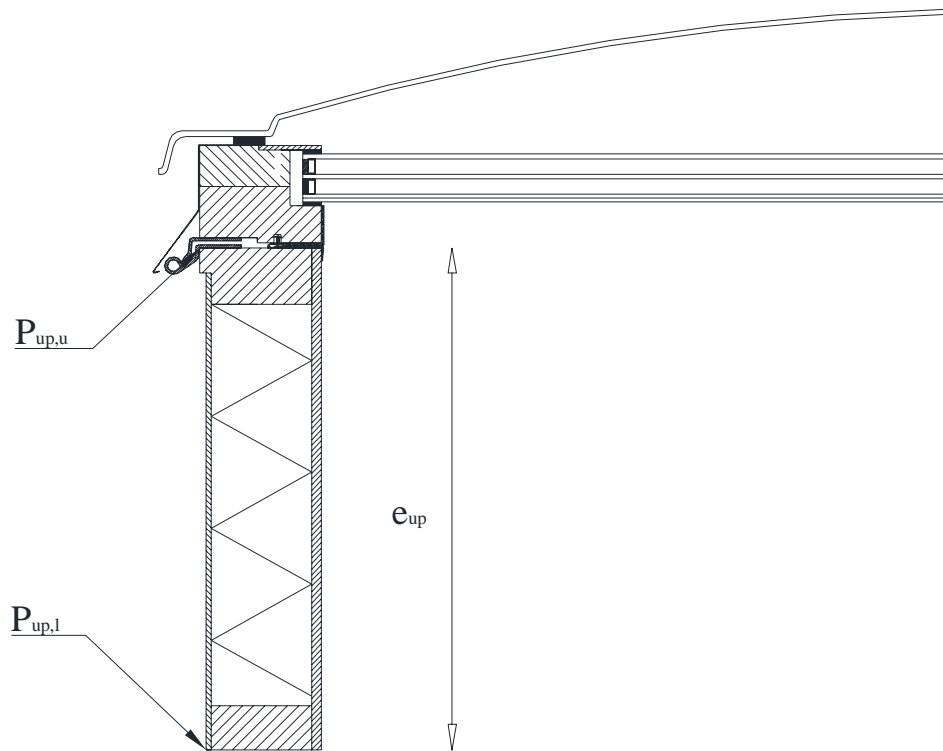
missä,

$\varepsilon$	on	sisäpinnan korjattu emissiviteetti [-]
---------------	----	--

#### 4.4 Kansiluukun ja jalustan pinta-alojen määrittäminen

Jalustan pinta-ala määritetään rakenteen ulkomittojen mukaan. Jalustan katsotaan alkavan sen alareunasta ja päättyvän jalustan ja reunaprofiilin rajapintaan, kuten kuvassa 4.5 on esitetty.





**Kuva 4.5.** Esimerkkikuva jalustan pinta-alamäärittämisessä käytettävistä mitoista

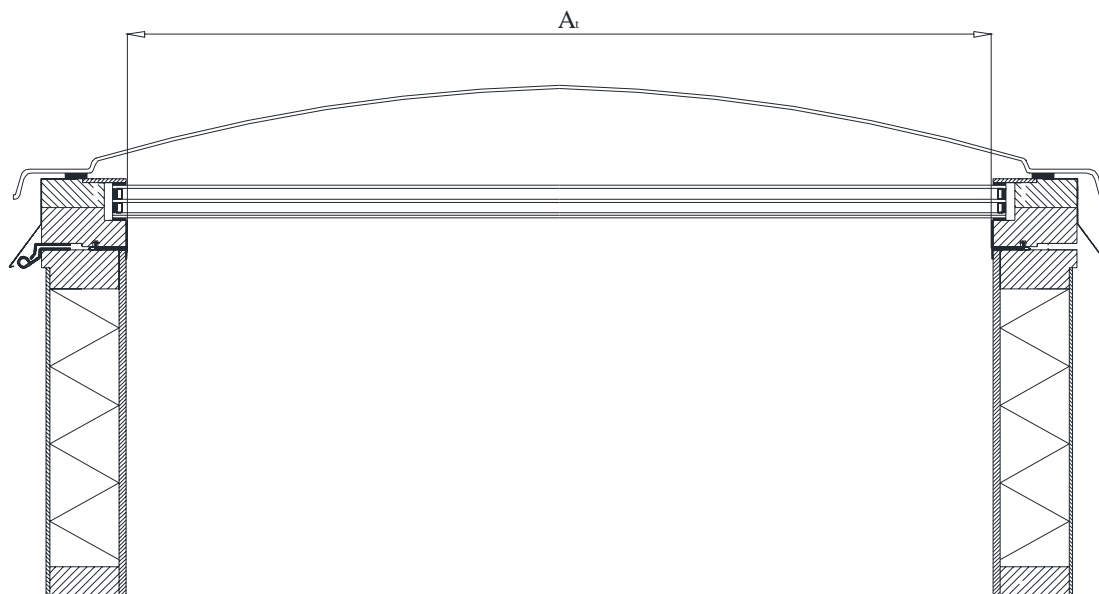
Pinta-ala lasketaan jalustan ulkopiirin ja korkeuden tulona. Jos jalusta on kalteva, käytetään piirinä yläpinnan piirin ja alapinnan piirin keskiarvoa, kuten kaavassa 4.24 on esitetty.

$$A_{up} = \frac{P_{up,u} + P_{up,l}}{2} e_{up} \quad (4.24)$$

missä,

$P_{up,u}$	on	jalustan piiri, mitattuna jalustan yläreunasta [m]
$P_{up,l}$	on	jalustan piiri, mitattuna jalustan alareunasta [m]
$e_{up}$	on	jalustan korkeus [m]

Kansiluukun pinta-ala määritetään valoaukon reunojen mukaan, kuten kuvassa 4.6 on esitetty. Mikäli kansiosa on kupumainen, voidaan käyttää valoaukon rajaamaa kuvun ulkopinnan pinta-alaa. Jos pinta-ala ei ole tiedossa, voidaan kaarevuus ottaa huomioon standardissa esitetyillä kertoimella  $k$ , joka on 1,12 korkeuden ja pituuden suhteen ollessa 1/6 ja 1/4 välillä. Jos korkeuden suhde pituuteen on välillä 1/6 ja 1/40, on  $k$  1 [9, s.52].

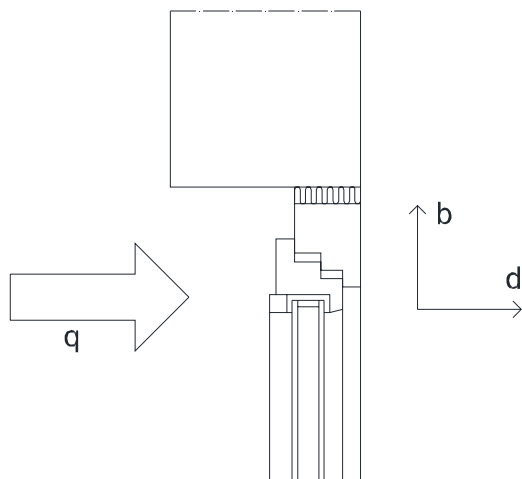


*Kuva 4.6. Esimerkkikuva kannen pinta-alamäärityksessä käytettävistä mitoista*

#### **4.5 Reunaprofiilin U-arvon ja reunaprofiilin ja kansiosan välisen kylmäsilan viivamaisten lisäkonduktanssien laskenta standardin EN ISO 10077-2 mukaan**

Savunpoistoluukuissa ja kattokuvuissa on paljon liitoksia ja näin ollen kylmäsiltoja. Verrattuna rakennuksissa olevien rakenteiden välisiin kylmäsiltoihin, savunpoistoluukut eroavat siinä, että liitosten rakenne on huomattavasti monimutkaisempi kuin normaaleiden rakenteiden liitoksissa (kuva 4.7). Tämä puolestaan asettaa haasteita rakenteen lämmöneristyskyvyn laskentaa ja arviointia ajatellen. Standardissa EN 10077-2 on annettu ohjeita laskentaa varten. Tämän luvun osioissa kirjaimella  $d$  merkitään rakenteen syvyyttä lämpövirran suunnassa ja kirjaimella  $b$  ontelon leveyttä, kuten kuvassa 4.7 on esitetty. Reunaprofiiliin  $U$ -arvon sekä kylmäsilan määrittäminen vaativat numeerisen laskentaohjelman käyttöä. Laskentaohjelman soveltuvuus täytyy todeta standardissa esitettyjen esimerkkirakenteiden avulla.

On kuitenkin otettava huomioon, että kaikissa rakenteissa ei ole eroteltavissa selvästi reunaprofiilia ja kantta toisistaan, eikä kaikkien luukkujen kannet ole homogeenisiä, minkä johdosta standardia EN ISO 10077-2 ei voida suoraan soveltaa. Mikäli näin käy, pitää rakenteen  $U$ -arvo laskea numeerisesti soveltaen standardia EN ISO 10211, mitä on käsitelty myöhemmin kappaleessa 4.7.

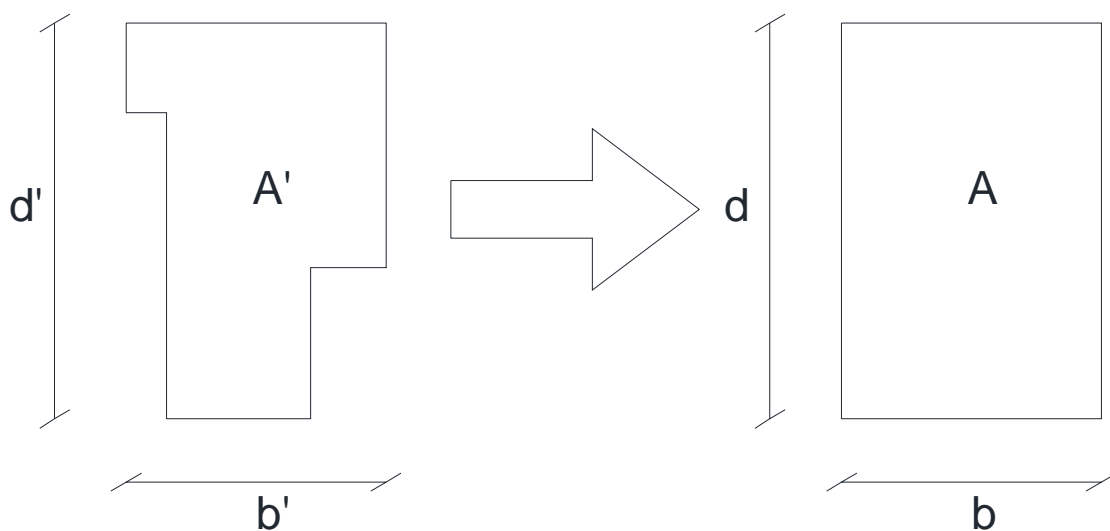


**Kuva 4.7.** Esimerkkikuva geometrialtaan monimutkaisesta liitoksesta. Kuvassa  $q$ :lla on merkitty lämpövirtaa ja nuoli osoittaa sen suunnan.  $D$  tarkoittaa mitta lämpövirran suunnassa ja  $b$  mitta lämpövirran suuntaa kohtisuoraan vasten.

#### 4.5.1 Suljetut ontelot profiilissa

Suljetut ontelot toimivat pääsääntöisesti lämmöneristeenä profiilissa. Ilmatilan lämmönjohtavuus ei kuitenkaan määräydy pelkästään ilman lämmönjohtavuuden perusteella, vaan siihen vaikuttaa myös konvektio ja säteily.

Mikäli ontelo ei ole suorakulmion muotoinen (kuva 4.8), muutetaan ontelon mitat vastaamaan suorakulmaisen ontelon mittoja. Näin yksinkertaistetaan ontelon geometriaa, jolloin myös säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokomponenttien laskenta yksinkertaistuu.



**Kuva 4.8.** Esimerkkikuva, jossa epäsäännöllisen muotoinen profiilin ontelo on muutettu säännöllisen muotoiseksi

missä,

$$b = \sqrt{A' b' / d'}$$

$$d = \sqrt{A' d' / b'}$$

Lämmönjohtavuus onteloissa on määritelty ekvivalentin lämmönjohtavuuden avulla, kuten kaavassa 4.25 on esitetty. Ekvivalentissa lämmönjohtavuudessa on otettu huomioon sekä konvektiolla että säteilyllä siirtyvä lämpöenergia.

$$\lambda_{eq} = \frac{d}{R_s} \quad (4.25)$$

missä,

d	on	kolon syvyys
R <sub>s</sub>	on	kolon lämmönvastus

Ontelon lämmönvastus (R<sub>s</sub>) määritetään kaavalla 4.26.

$$R_s = \frac{1}{h_a + h_r} \quad (4.26)$$

missä,

h <sub>a</sub>	on	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin
h <sub>r</sub>	on	säteilyn lämmönsiirtokerroin

Suljetussa ontelossa pääsee tapahtumaan ainoastaan luonnollista konvektiota. Luonnollisen konvektion suuruuteen vaikuttaa lämpötilaero, ontelossa olevan aineen materiaaliominaisuudet ja ontelon muoto. Standardissa on oletettu, että ontelon sisällä on ilmaa, jolloin konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen suuruuteen vaikuttaa ainoastaan ontelon leveys ja ontelon pintojen välillä vallitseva lämpötilaero, kuten kaavassa 4.27 on esitetty.

$$h_a = \begin{cases} \frac{C_1}{d}, \text{ jos } b < 5 \text{ mm} \\ \max\left(\frac{C_1}{d}; C_2 \sqrt[3]{\Delta T}\right), \text{ muussa tapauksessa} \end{cases} \quad (4.27)$$

missä,

$C_1$	on	0,025 W/(m*K)
$C_2$	on	0,73 W/(m <sup>2</sup> *K <sup>4/3</sup> )
$b$	on	kolon leveys [m]
$\Delta T$	on	lämpötilaero kolon pintojen välillä [K], jos ei ole muuta tietoa saatavilla käytetään arvoa 10 K

Säteilyn lämmönsiirtokerroin määritetään Stefan-Boltzmannin lakiin perustuen kuten aiemmin lasien yhteydessä, kaavalla 4.28

$$h_r = \frac{4\sigma F T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4.28)$$

missä,

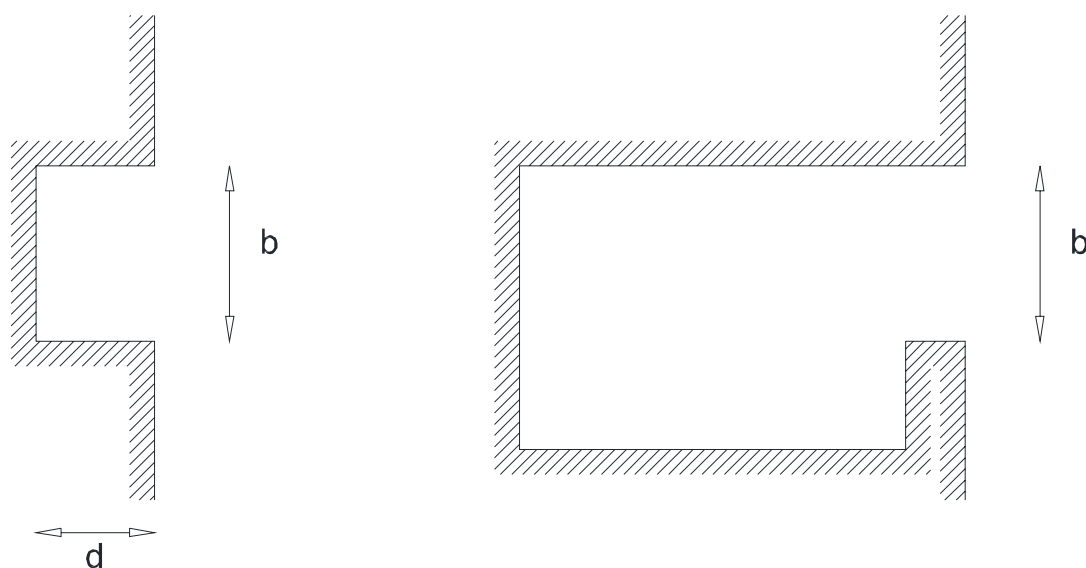
$F$  on näkyvyyskerroin [-]

Näkyvyyskerroin kertoo kuinka paljon pinta ”näkee” toista pintaa ja näin ollen kuinka paljon pinnasta siirtyy lämpöenergiaa säteilemällä toiseen pintaan. Näkyvyyskerroin suorakulmaisessa poikkileikkauksessa määritetään kaavalla 4.29

$$F = \frac{1 + \sqrt{1 + (d/b)^2} - d/b}{2} \quad (4.29)$$

#### 4.5.2 Hieman ja hyvin tuuletetut kolot profiilissa

Hieman tuulettuvana kolona pidetään koloa, jossa  $b$  mitta on pienempi tai yhtä pieni kuin 10 mm ja  $d$  mitan on oltava vähintään yhtä suuri kuin  $b$  mitta, kuten kuvassa 4.9 on esitetty. Hieman tuulettuvassa kolossa ilmavirta pääsee vaikuttamaan konvektion suuruuteen pääsääntöisesti voimistaen sitä. Tämän seurauksena konvektiivinen lämmönsiirtokerroin kasvaa ja kolon lämmönvastus heikkenee. Myös säteilyn osalta on tilanne samanlainen. Säteilyä ei tapahdukaan enää pelkästään kahden pinnan välillä, vaan aukon sijainnista riippuen pinta voi ”nähdä” muitakin pintoja, joiden emissiviteetti ja lämpötila voivat poiketa kolon pintojen arvoista.



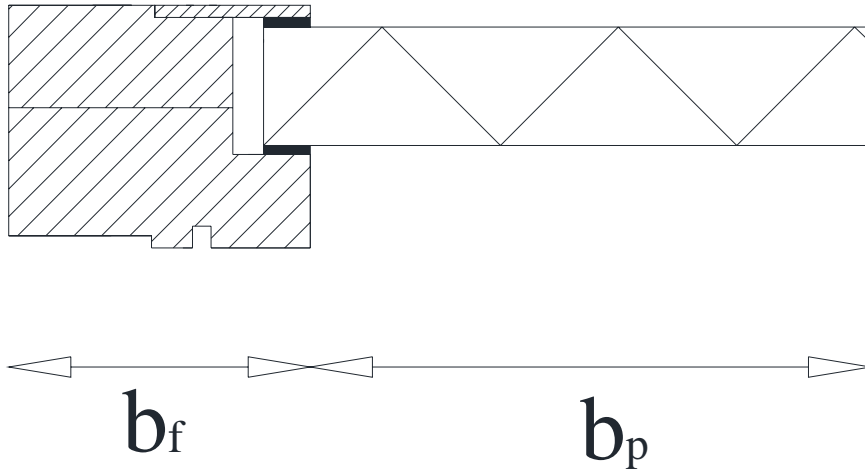
**Kuva 4.9.** Esimerkkikuva hieman ja hyvin tuulettuvasta kolosta profiilissa. Kuvan vasemmassa laidassa on esitetty hyvin tuulettuva kolo ja kuvan oikeassa laidassa on esitetty hieman tuulettuva kolo.

hieman tuulettuvan kolon ekvivalentti lämmönjohtavuus on standardin mukaan kaksi kertaan vastaavanlaisen tuulettumattoman kolon lämmönjohtavuus [20, s. 10].

Hyvin tuulettetuiksi on määritelty kolot, joissa  $b$  mitta on yli 10 mm. Hyvin tuulettetuissa koloissa konvektio ja säteily pääsee tapahtumaan hallitsemattomasti. Tämän johdosta hyvin tuulettuvissa koloissa käytetään normaaleita pintavastuksia.

#### 4.5.3 U-arvon määrittäminen

Reunaprofiilin U-arvo määritetään numeerisen laskentaohjelman avulla. Laskentamenetelmässä laskentaohjelmaan mallinnetaan reunaprofiili, jossa läpinäkyvä osa on mallinnettu saman paksuisena eristepaneelina, jonka lämmönjohtavuus on  $0,035 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ , kuten kuvassa 4.10 esitetty. Standardissa on lisäksi määrätty, että eristepaneeli ei saa mennä yli 15 mm profiilin sisään ja ilmatila eristepaneelin ja profiilin välillä pitää olla vähintään 5 mm.



**Kuva 4.10.** Esimerkkikuva profiilin  $U$ -arvoa määritettäessä käytettävästä rakennemallista. Mitan  $b_p$  pitää olla vähintään 190 mm

Tarkasteltavan profiilin ja eristepaneelin välille asetetaan 1 °C lämpötilaero, minkä avulla saadaan selville lämpövirran tiheyden jakauma rakenteessa kyseisellä lämpötilaerolla. Kun lämpövirran tiheys integroidaan rakenteiden pintoja pitkin, saadaan selville mallinnetun rakenteen lämpötekninen kytkentäkerroin syvyysmetriä kohden ( $L_f^{2D}$ ).  $U$ -arvo lasketaan kaavalla 4.30

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p b_p}{b_f} \quad (4.30)$$

missä,

$L_f^{2D}$	on	mallinnetun liitoskohdan lämpötekninen kytkentäkerroin [W/(m*K)]
$U_p$	on	eristepaneelin $U$ -arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]
$b_p$	on	eristepaneelin pituus [m], joka on mallinnuksessa vähintään 190 mm
$b_f$	on	reunaprofiilin pituus [m]

#### 4.5.4 Kylmäsilan määrittäminen

Profiilin ja kansiosan välinen kylmäsilta määritetään pitkälti samalla tavalla kuin profiilin  $U$ -arvo. Ainoana erona on, että läpinäkyvä osa mallinnetaan, sellaisena kun se todellisuudessa on. Kylmäsilta lasketaan kaavalla 4.31

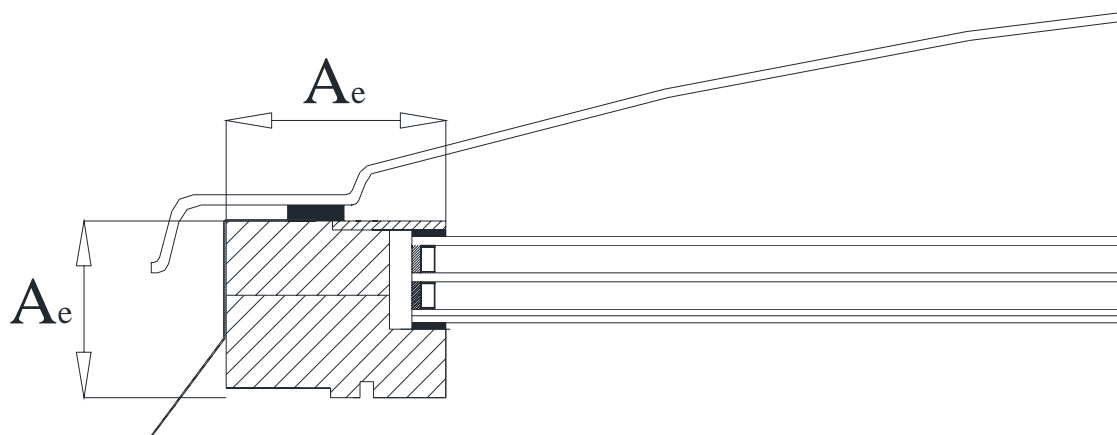
$$\psi = L_\psi^{2D} - U_f b_f - U_g b_g \quad (4.31)$$

missä,

$L_{\psi}^{2D}$	on	mallinnetun liitoskohdan lämpötekkinen kytkentäkerroin [W/(m <sup>2</sup> *K)]
$U_g$	on	läpinäkyvän osan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]
$b_g$	on	läpinäkyvän osan pituus [m], joka on mallinnuksessa vähintään 190 mm

## 4.6 Reunaprofiilin pinta-alan määrittäminen

Reunaprofiilin pinta-ala on jalustan ja kannen valoaukon väliin jäävän osan pinta-ala, kuten kuvassa 4.11 on esitetty. Pinta-alassa otetaan huomioon sekä pysty- että vaakasuora osuus profiilista.



**Kuva 4.11.** Esimerkkikuva reunaprofiilin pinta-alan määrittämisessä käytetyistä mitoista.

## 4.7 U-arvon numeerinen laskenta standardin EN ISO 10211 mukaan

Standardi EN ISO 10211 käsittelee kylmäsiltojen ja lämpövirtojen numeerista laskentaa. Siinä ohjeistetaan muun muassa rakenteen mallintamista, mittajärjestelmän käyttöä, materiaalien lämmönjohtavuuden määrittämistä, viivamaisten ja pistemäisten kylmäsiltojen määrittämistä ja lopussa on esitetty muutama laskenta laskentatapa, joiden avulla voidaan testata laskentaohjelman soveltuvuutta numeeriseen laskentaan.

Standardin perusajatuksena on, että tarkasteltava kohde on mallinnettava laskentaohjelmaan mahdollisimman tarkasti. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kohde tulee mallintaa kokonaisuutena, jos se on mahdollista. Tarkasteltaessa suurempia kokonaisuuksia, ei ole kuitenkaan aina mielekästä mallintaa koko kohdetta, jolloin malli joudutaan pilkko-



maan pienempiin osiin. Laskentamallia jaettaessa on kuitenkin varmistuttava, että tarkasteltava kappale edustaa todellista rakennetta. Toisin sanoen kaikki säännölliset kylmäsillat ja toistuvat rakenneosat on otettava huomioon. Standardi antaa kolme sääntöä jakamista varten [11, s.8], jotka ovat:

- Rakenteen symmetria linjat
- $d_{\min}$  jos rakenteen symmetrialinja rakenteen keskikohdasta mitattuna ei ole lähempänä
- Maanpinta

$d_{\min}$  on minimietäisyys, joka on 1 m tai kolme kertaa liittyvän rakenteenosan paksuus.

Laskentamallia voidaan yksinkertaistaa laskemalla pienet pistemäiset tai viivamaiset kylmäsillat mukaan materiaalikerroksen lämmönjohtavuuteen, kuten kaavoissa 4.32 ja 4.33 on esitetty, mutta pelkistetyn rakennekerroksen lämmönjohtavuudeksi ei saa tulla yli 1,5 kertaa alhaisemman lämmönjohtavuuden omaavan materiaalin lämmönjohtavuus. Lisäksi pelkistetty rakenteenosa ei saa olla liitoskohta [11, s.15]

$$\lambda' = \frac{d}{\frac{A}{L_{3D}} - R_{si} - R_{se} - \sum \frac{d_j}{\lambda_j}} \quad (4.32)$$

$$\lambda' = \frac{d}{\frac{l_{tb}}{L_{2D}} - R_{si} - R_{se} - \sum \frac{d_j}{\lambda_j}} \quad (4.33)$$

missä,

$d$	on	epähomogeenisen rakennekerroksen paksuus [m]
$A$	on	tarkasteltavan rakenteen osan pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$l_{tb}$	on	pelkistettävän viivamaisen kylmäsillan pituus [m]
$L_{3D}$	on	tarkasteltavan rakenteenosan lämpötekninen kytkentäkerroin määritettynä numeerisella 3D-laskennalla [W/K]
$L_{2D}$	on	tarkasteltavan rakenteenosan lämpötekninen kytkentäkerroin määritettynä numeerisella 2D-laskennalla [W/(m*K)]
$d_j$	on	rakenteenosassa olevan homogeenisen osan paksuus [m]
$\lambda_j$	on	rakenteenosassa olevan homogeenisen osan lämmönjohtavuus [W/(m*K)]
$R_{si}$	on	sisäpinnan pintavastus [(m <sup>2</sup> *K)/W]
$R_{se}$	on	ulkopinnan pintavastus [(m <sup>2</sup> *K)/W]

Kun tarkasteltavan rakenteen lämpövirtajakauma on saatu selville kolmiulotteisen numeerisen laskennan avulla, voidaan alkuperäinen laskentamalli pilkkoa yksiulotteisiin ja kaksiulotteisiin osiin, minkä avulla voidaan tutkia rajapintojen ja pistemäisten kohtien vaikutusta rakenteen lämpövirtoihin. On kuitenkin huomattava, että tarkasteltavan rakenteen muuttuessa myös yksityiskohtien vaikutus muuttuu.

## 5 TUOTTEIDEN MALLINTAMINEN JA U-ARVON LASKENTA

Tässä kappaleessa käsitellään tuotteiden mallintamista laskentaohjelmaan ja kokoonpanomallien muuttamista laskentamalleiksi. Tuotteiden detaljit sekä tarkat mitat selkiytyivät työn edetessä ja eri laskentamalleja testatessa. Lopulta kuitenkin onnistuttiin tekemään laskentamallit joissa detaljit pystyttiin ottamaan huomioon numeerisen laskentaohjelman asettamien rajojen puitteissa.

### 5.1 Käytetty mallinnusohjelma

Mallinnuksessa käytettiin apuna SolidWorks ohjelmistoa. SolidWorksin omistaa ja sitä kehittää amerikkalainen yhtiö nimeltään Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Yhtiö on perustettu vuonna 1993 [21].

SolidWorks on 3D-mallinukseen käytettävä ohjelma, jolla voidaan tehdä sekä pinta- että tilavuuselementtejä. Ohjelman avulla voidaan rakenteen osat linkittää toisiinsa ja näin ollen tehdä erilaisia liike- ja törmäystarkasteluja. Ohjelman käyttöliittymä muodostuu kahdesta osasta: sovellus- ja grafiikkaikkunasta. Sovellusikkuna löytyy ohjelman yläreunasta ja siitä löytyy komentoja mallin muokkaamista varten. Grafiikkaikkuna muodostuu puolestaan paneelialueesta ja tehtäväruudusta. Paneelialueessa voi olla näkyvissä esimerkiksi piirrepuu, ominaisuuspaneeli tai konfiguraationpaneeli. Tehtäväruudussa on puolestaan komentoja työn aloittamiseen, tiedostojen hallintaan ja standardiosien haakuun [22].

Tässä työssä tarkastellut rakenteet on pääsääntöisesti mallinnettu Kera Group:n toimesta. Mallit on tämän jälkeen siirretty Comsoliin livelink for Comsolin avulla, missä varsinainen laskenta on suoritettu. Suurintaosaa malleista jouduttiin muokkaamaan joko Comsolissa tai SolidWorksissa ennen kuin ne soveltuivat laskentaan. Tehtyjä muutoksia on käsitelty kappaleessa 5.4.

### 5.2 Käytetty laskentaohjelma

Numeerisessa laskennassa käytettiin Comsol Multiphysics 4.3- tietokoneohjelmaa, jota valmistaa ja kehittää ruotsalaislähtöinen yhtiö COMSOL AB. Yhtiö on perustettu vuonna 1986 [3]. Comsolin toiminta perustuu elementtimenetelmän käyttöön, mikä on käytännössä osittaisdifferentiaaliryhmän reuna-arvotekävän likimääräinen ratkaisumene-

telmä [4]. Elementtimenetelmässä tarkasteltava kappale jaetaan äärellisiin osiin, niin kutsuttuihin elementteihin. Elementit liittyvät toisiinsa solmupisteillä, jotka ovat tietyllä perusteilla valittuja elementtien pisteitä. Ulkopuoliset rasitukset ajatellaan kohdistuvaksi edellä mainittuihin solmupisteisiin, joista interpoloimalla saadaan kappaleen synnyttämä vaste solmupisteiden välisillä alueilla. Ratkaisu on sitä tarkempi mitä tiheämpi elementtiverkko on

Comsolissa on valittavana eri ”fysiikoita”, joiden avulla voidaan keskittyä tarkastelemaan jotain tiettyä fysikaalista ilmiötä. Geometriseen malliin on mahdollista lisätä useampia eri ”fysiikoita”. Tuloksiin on kuitenkin aina suhtauduttava kriittisesti ja arvioitava niiden todenmukaisuutta. Comsolin soveltuvuus lämpövirtojen numeeriseen laskentaan tutkittu ja todettu sopivaksi standardin EN ISO 10211 liitteen A mukaan [12, taulukko 2, s. 14].

Lämmönsiirtofysiikka on yksi valittavista fysiikoista. Lämmönsiirto Comsolissa perustuu pääosin termodynamiikan 1. pääsääntöön, jonka mukaan energia säilyy systeemissä vakiona, mutta voi muuttaa muotoaan. Comsolissa tämä on puettu kaavaksi 5.1 [23].

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau} : \mathbf{S} - \frac{T}{\rho} \frac{\partial p}{\partial T} \Big|_p \left( \frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p \right) + Q \quad (5.1)$$

missä,

$\rho$	on	materiaalin tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$	on	ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [J/(kg*K)]
$T$	on	lämpötila [K]
$t$	on	aika [h]
$\mathbf{u}$	on	nopeusvektori [m/s]
$\mathbf{q}$	on	lämpövirrantiheysvektori [W/m <sup>2</sup> ]
$\boldsymbol{\tau}$	on	viskositeettinen jännitystensori [Pa]
$p$	on	paine [Pa]
$\mathbf{S}$	on	muodonmuutosnopeus tensori [1/s]
$Q$	on	tilavuuden lämmönlähde [W]

Kaava 4.1 on johdettu Navier-Stokes yhtälöstä, joka on kehitetty ennen kaikkea fluidien mallintamiseen. Rakennusteknisissä sovellutuksissa tarkastellaan kuitenkin yleensä lämmönsiirtoa kiinteissä materiaaleissa, pois lukien ilman- tai vedenvirtauksiin liittyvät tarkastelut. Näin ollen kaava 5.1 sievenee kaavaksi 5.2 [24] kuvaten lämmönsiirtoa materiaaleissa.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = -\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + Q \quad (5.2)$$

missä,

$k$  on materiaalin lämmönjohtavuus [W/(m\*K)]

Kaavassa 5.2 ensimmäinen termi ( $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ ) kuvaa kappaleeseen varastoituvaa lämpöenergiaa, toinen termi ( $-k\nabla T$ ) kuvaa lämpöenergian siirtymistä johtumalla, kolmas termi ( $-\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T$ ) kuvaa lämpöenergian siirtymistä konvektion avulla ja neljäs termi ( $Q$ ) kuvaa kappaleen synnyttämää lämpöenergiaa [24].

Tarkasteltaessa rakenteissa tapahtuvaa lämmönsiirtoa on rajapintojen ominaisuudet ja olosuhteet otettava huomioon. Kun tarkastellaan tavanomaisia rakenteita, lämmönsiirto eroaa rajapinnoilla verrattuna lämmönsiirtoon materiaaalissa pääasiassa säteilyn ja konvektion komponenttien osalta. Normaaleissa rakennusteknisissä sovelluksissa käytettävien materiaalien sisällä ei tapahdu niin suurissa määrin lämmönsiirtoa säteilemällä tai konvektiolla kuin rakenteen rajapinnoilla. Comsolissa lämmönsiirtoa rajapinnoilla kuvaa kaava 5.3 [24].

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = q + h(T_{inf} - T) + \varepsilon \sigma F(T_{amb}^4 - T^4) - \nabla_t \cdot (-d_s k_s \nabla_t T) \quad (5.3)$$

missä,

$\mathbf{n}$	on	pinnan normaalivektori [-]
$q$	on	pinnan lämpövirran tiheys [W/m <sup>2</sup> ]
$h$	on	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/(m <sup>2</sup> *K)]
$\varepsilon$	on	pinnan emissiviteetti [-]
$\sigma$	on	Stefan-Boltzmannin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m <sup>2</sup> *K <sup>4</sup> )]
$F$	on	näkyvyyskerroin [-]
$d_s$	on	hyvin lämpöä johtavan kerroksen paksuus [m]
$k_s$	on	hyvin lämpöä johtavan kerroksen lämmönjohtavuus [W/(m <sup>2</sup> *K)]
$\nabla_t$	on	hyvin lämpöä johtavan kerroksen pinnan gradientti
$T_{inf}$	on	ympäröivän aineen lämpötila [K]
$T_{amb}$	on	ympäröivän pinnan lämpötila [K]

Lämpövirtoja ja U-arvoja määritettäessä pitää rakenteen pintojen välille saada aikaiseksi lämpötilaero. Comsolissa pinnan lämpötila määritetään ns. Newtonin jäähdytyslain avulla, kuten kaavassa 5.4 on esitetty [25]. Kaavan avulla voidaan laskea pintaan tulevan lämpövirran tiheys kun ympäröivän ilman lämpötila ja pinnan lämmönsiirto-ominaisuudet on tiedossa.

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \quad (5.4)$$

missä,

$q_0$	on	pinnalle tuleva lämpövirrantiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$h$	on	pinnan lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]
$T_{\text{ext}}$	on	ympäröivän tilan lämpötila [K]
$T$	on	pinnan lämpötila [K]

Pinnan lämmönsiirtokertoimen avulla voidaan ottaa huomioon pintaan vaikuttava lämpösäteily ja konvektio johtumisen lisäksi. Tässä työssä pinnan lämmönsiirtokertoimina on käytetty standardissa EN 6946 määritettyjen pintavastusten käänteislukuja, mitä neuvotaan käyttämään myös muissa tutkituissa standardeissa.

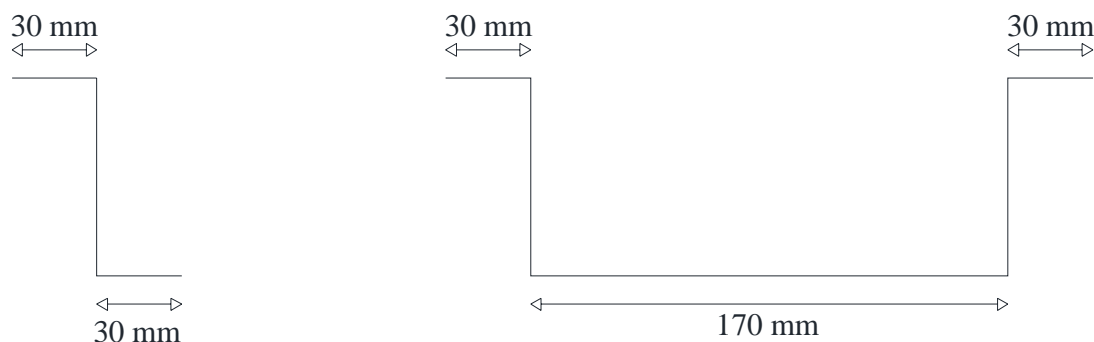
### 5.3 Tarkasteltavat rakenteet

Tässä työssä mallinnetut rakenteet ovat valoaukoltaan  $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$  ja jalustan korkeutena on käytetty Kera Groupin ilmoittamia mittoja. Luukun koon kasvaessa rakenteiden kylmäsiltojen osuus pinta-alaan nähden muuttuu, minkä seurauksena myös U-arvot muuttuvat. Tutkittujen luukkujen rakenteet on esitetty karkealla tasolla taulukossa 5.1. Luukkujen tarkempia detaljeja tarkastellaan myöhemmin tässä luvussa.

**Taulukko 5.1.** Tutkittujen rakenteiden paksuudet ja tukirakenteissa käytetyt materiaalit. Kaltevien luukkujen osalta on ilmoitettu jalustan korkeuden keskiarvo.

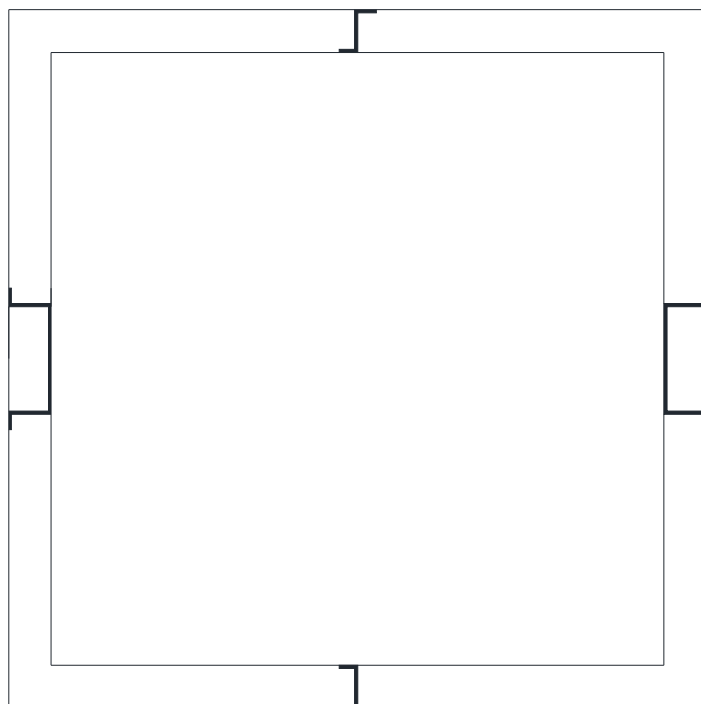
Luukku	Jalustan rakenne ja paksuus [mm]	Kannen rakenne ja paksuus [mm]	Jalustan korkeus [mm]
Orivent 01	Puinen kehikko, 70 mm	Kolminkertainen akryylikupu, n. 14 mm	750
Orivent 21	Puinen kehikko, 70 mm	Puinen kehikko, 100 mm	750
Orivent 23	Metallinen kehikko, 70 mm	Metallinen kehikko, 100 mm	600
Orivent 31	Metallinen kehikko, 70 mm	Metallinen kehikko, 100 mm	n. 600
Orivent 41	Puinen kehikko, 70 mm	Valoaläpäisevä muovinen kenno, 25 mm	n. 600
Orivent 51	Metallinen kehikko, 100 mm	Metallinen kehikko, jossa 48 mm paksu 3-kertainen lasi	810
Orivent 52	Metallinen kehikko, 70 mm	Kaksilehtinen metalli kehikko, 100 mm	750
Passiivikupu	Puinen kehikko, 80 mm	Akryylikupu ja kolminkertainen lasi	420

Taulukosta huomataan, että jalustan paksuus on yleensä 70 mm ja kannen 100 mm. Poikkeuksia tähän muodostaan läpinäkyvät kannet (Orivent 01, 41, 51L ja Passiivikupu) ja Orivent 51:n ja 51L:n jalustat, joiden paksuus on 100 mm sekä Passiivikuvun jalusta, jonka paksuus on 80 mm. Lämmöneristeenä jalustoissa ja umpinaisissa kansissa käytetään mineraalivillaa lukuun ottamatta Passiivikupua, jossa lämmöneristeenä polyuretaania. Metallisissa jalustoissa ja kansissa kehikko muodostuu teräksisistä Z- ja  $\Omega$ -profiileista, joiden dimensiot on esitetty kuvassa 5.1.



**Kuva 5.1.** Metallirakenteisissa luukuissa tyypillisesti käytettyjen teräsprofiilien poikkileikkaukset. Vasemmassa laidassa on Z-profiili ja oikeassa laidassa  $\Omega$ -profiili (hattuprofiili)

Profiilien korkeus määräytyy eristepaksuuden mukaan ollen tyypillisesti 70 mm jalustoissa ja 100 mm kansissa. Z-profiilin ainevahvuus on 0,7 mm ja  $\Omega$ -profiilin 1,5 mm ja ne sijoitetaan rakenteisiin siten, että niiden välinen etäisyys toisistaan on maksimissaan 500 mm.  $\Omega$ -profiilit sijoittuvat jalustoissa saranasivulle ja sen vastakkaiselle sivulle ja Z-profiilit kahdelle muulle sivulle, kuten kuvassa 5.2 on esitetty. Poikkeuksen tähän muodostaa Orivent 52, jossa on kolme  $\Omega$ -profiilia ja yksi Z-profiili.

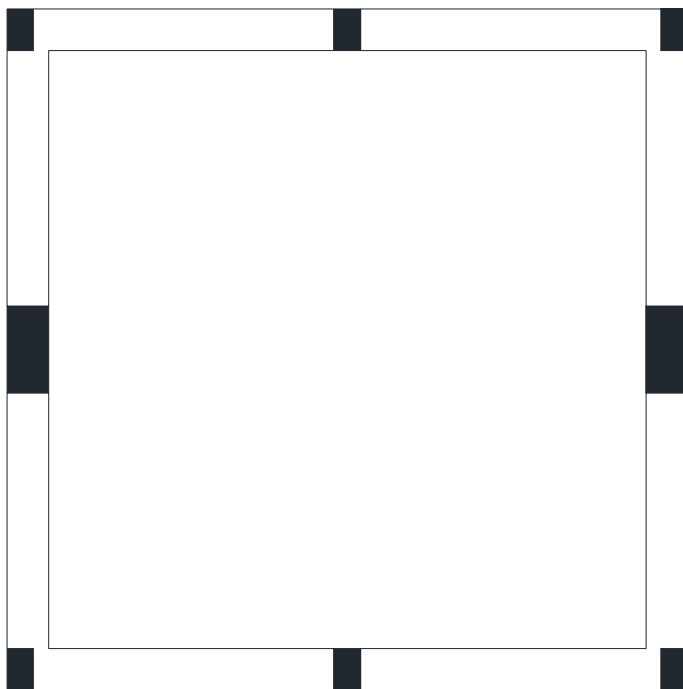


**Kuva 5.2.** Metallirakenteisen jalustan tyypillinen poikkileikkaus

Umpinaisissa kansissa on yleensä  $\Omega$  -profiili keskellä. Luukun koon kasvaessa, vahvistetaan kannen rakennetta lisäämällä kanteen Z-profiileita, kuten edellä esitettiin. Metallisten luukkujen pinnoissa on ohutmetallilevy, jonka paksuus vaihtelee 0,5 mm:stä 0,7mm:n

Puisissa luukuissa kehikko koostuu ala- ja yläohjauspuista ja puisista tolpista ohjauspuiden välissä. Yläohjauspuu on paksuudeltaan pääsääntöisesti 45 mm ja alaohjauspuu 35 mm. Puiset tolpat ovat poikkileikkaukseltaan 45 mm \* 70 mm ja 145 mm \* 70 mm. Poikkileikkaukseltaan suuremmat tolpat ovat sijoitettu saranasivulle ja sen vastakkaiselle sivulle. Pienemmät tolpat ovat sijoitettu rakenteen nurkkiin ja saranattomien sivujen keskelle, kuten kuvassa 5.3 on esitetty.





**Kuva 5.3.** Puurakenteisen jalustan tyypillinen poikkileikkaus.

Puisten luukkujen ulkopinnassa käytetään yleensä 4 mm paksua sekavaneria ja sisäpinnan materiaalina on joko 0,5 mm ohutmetallilevy tai silikaattilevy.

Luukut ovat pääsäännöisesti ulkomuodoltaan suorakulmaisia särmiöitä. Poikkeuksen tähän muodostaa Orivent 01 ja Passiivikupu, joissa kansi muodostuu kuvusta. Lisäksi Orivent 31 ja Orivent 41 ovat muodoltaan kaltevia, millä on teoriassa pieni vaikutus rakenteen U-arvoon. Luukkujen ulkomuodot on esitelty tarkemmin liitteissä.

### 5.3.1 Jalustojen yksityiskohtia

Vaikka jalustojen rakenteet ovat pääpiirteittäin samanlaiset, on rakenteissa pieniä eroja, joista aiheutuu eroja myös U-arvoihin. Neljä jalustaa on puurakenteisia, jotka näin ollen eroavat neljästä metallirakenteisesta jalustasta. Lisäksi metalli- ja puurakenteiset jalustat eroavat keskenään toisistaan. Tässä kappaleessa on esitelty tarkemmin jalustojen yksityiskohtia.

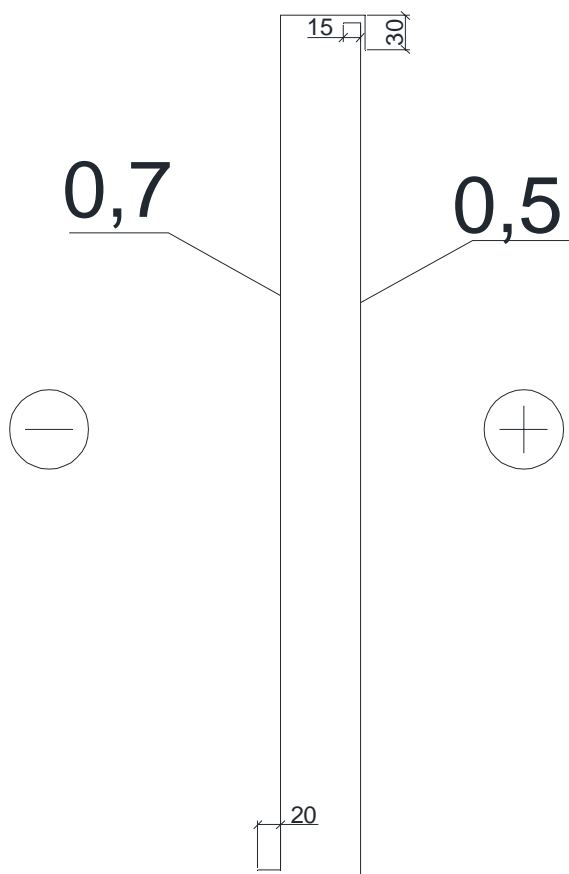
#### Orivent 23

Jalustan rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Teräsohutlevy 0,7mm
- Mineraalivilla 70 mm

- Teräsohutlevy 0,5 mm

Jalustan yläreunan muodostaa ulkopinnan teräsohutlevy joka liittyy sisäpinnan teräsohutlevyn kanssa ja alapinnan muodostaa sisäpinnan teräsohutlevy, joka liittyy ulkopuolen ohutlevyn kanssa. Jalustan poikkileikkaus on esitetty kuvassa 5.4



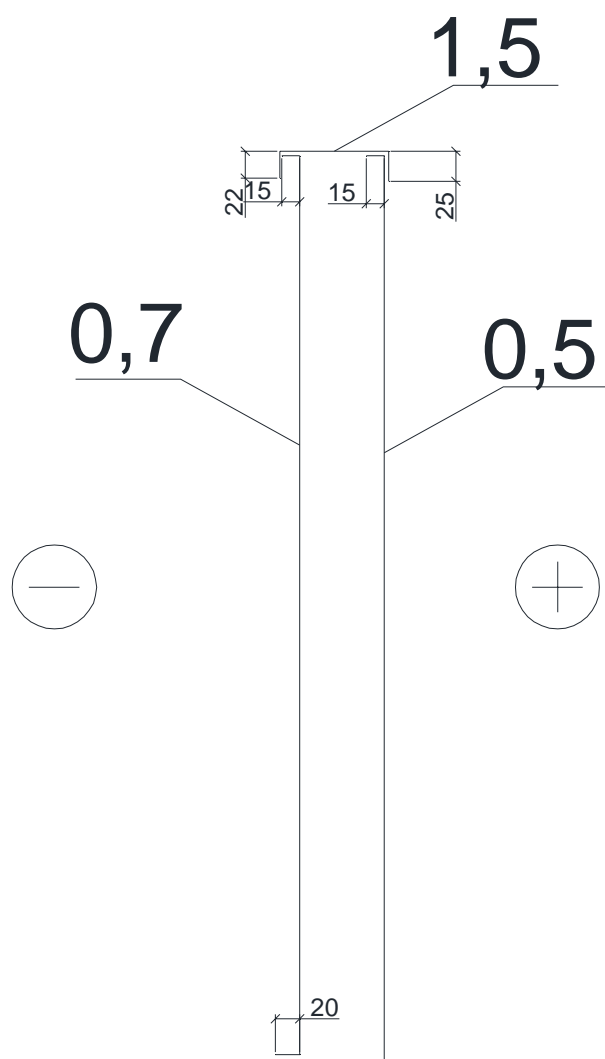
**Kuva 5.4.** Orivent 23- jalustan poikkileikkaus

### Orivent 31

Jalustan rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Teräsohutlevy 0,7mm
- Mineraalivilla 70 mm
- Teräsohutlevy 0,5 mm

Erona Orivent 23-rakenteeseen on, että jalustan yläpintaan asennetaan 1,5 mm paksu teräsohut profiili, joka sitoo sisä- ja ulkopinnan toisiinsa kuten kuvassa 5.5 on esitetty.



**Kuva 5.5.** Orivent 31- jalustan poikkileikkaus

## Orivent 52

Jalustan rakenne on samanlainen kuin Orivent 31:ssä (kuva 5.5), mutta sisäpuolen teräsohutlevyn paksuus on 0,7 mm. Lisäksi jalustassa on kolme  $\Omega$  -profiilia ja vain yksi Z-profiili. Avausmekanismista riippuen jalustan rakenne voidaan toteuttaa myös kahdella  $\Omega$ - ja kahdella Z-profiililla

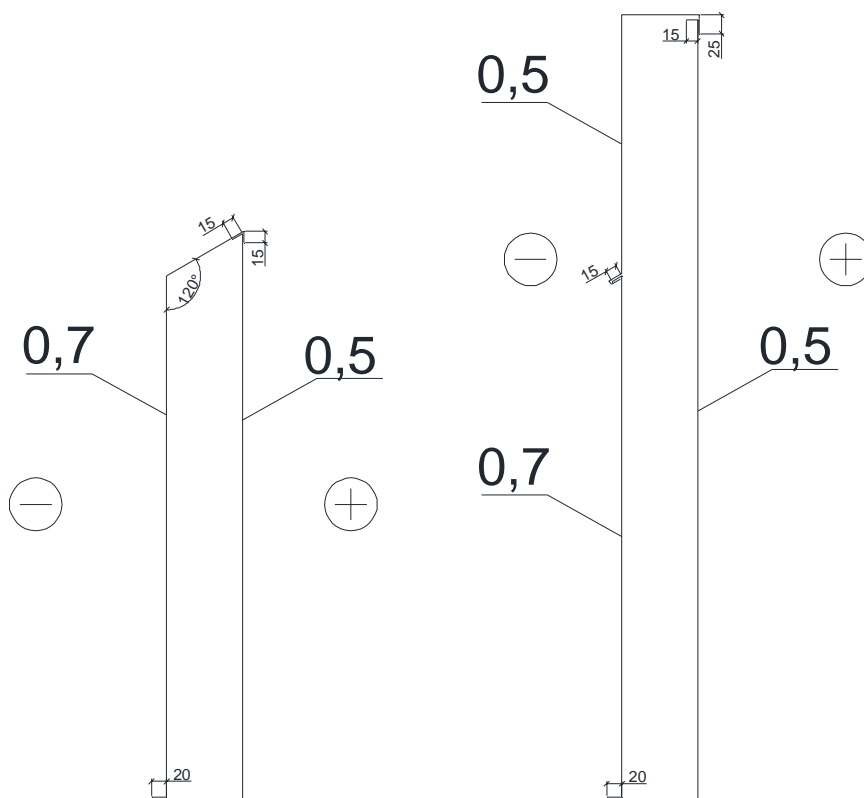
## Orivent 51 ja 51L

Jalustan rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Teräsohutlevy 0,7mm ja ylempänä 0,5 mm

- Mineraalivilla 100 mm
- Teräsohutlevy 0,5 mm

Jalustan rakenne on Orivent 23 mukainen, mutta ulkoteräsohutlevyn paksuus vaihtuu 0,7 mm:stä 0,5 mm:n siirryttäessä alhaalta ylöspäin ja limityspituudet muuttuvat hie-  
man. Jalustan rakenne on esitetty kuvassa 5.6



**Kuva 5.6.** Orivent 5- jalustan poikkileikkaus. Kuvan vasemmassa laidassa on saranasi-  
vun poikkileikkaus ja kuvan oikeassa laidassa on päädyn leikkaus.

### Orivent 01 ja Orivent 21

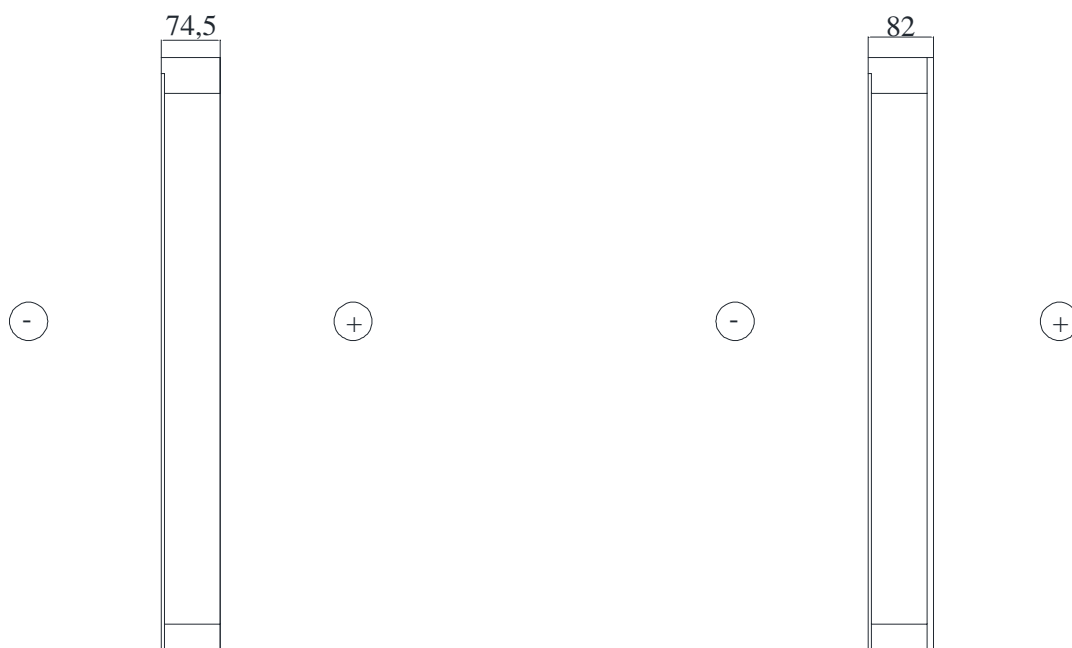
Orivent 21 ja 01 -jalustat ovat puurakenteisia. Orivent 01:ssä käytetään sisäpinnassa silikaattilevyä toisin kuin Orivent 21:ssä, jossa sisäpinnassa käytetään 0,5 mm paksua teräsohutlevyä. Orivent 01:n jalusta voidaan toteuttaa myös metallirakenteisena. Jalusto-  
jen rakenteet on esitetty kuvassa 5.7.

Orivent 01-jalustan rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Sekavaneri 4 mm
- Mineraalivilla 70 mm
- Silikaattilevy 8 mm

Orivent 21-jalustan rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Sekavaneri 4 mm
- Mineraalivilla 70 mm
- Teräsohutlevy 0,5 mm



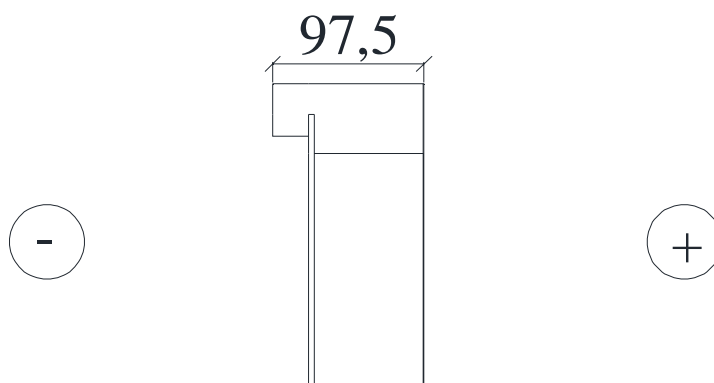
**Kuva 5.7.** Kuvan vasemmassa laidassa on Orivent 21- jalustan poikkileikkaus ja kuvan oikeassa laidassa on Orivent 01- jalustan poikkileikkaus.

## Orivent 41

Orivent 41- jalustan rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Sekavaneri 4 mm
- Mineraalivilla 70 mm
- Teräsohutlevy 0,5 mm

Kuten jo aikaisemmin mainittiin, Orivent 41:n jalusta on muodoltaan kalteva. Lisäksi jalustan rakenne eroaa Orivent 21 ja 41:stä yläohjauspuun detaljin osalta. Orivent 01:n yläohjauspuun leveys on 97 mm, jolloin se muodostaa ulokkeen rakenteeseen, toisin kuin Orivent 01 ja 21:ssä. Jalustan yläpään detalji on esitetty tarkemmin kuvassa 5.8.



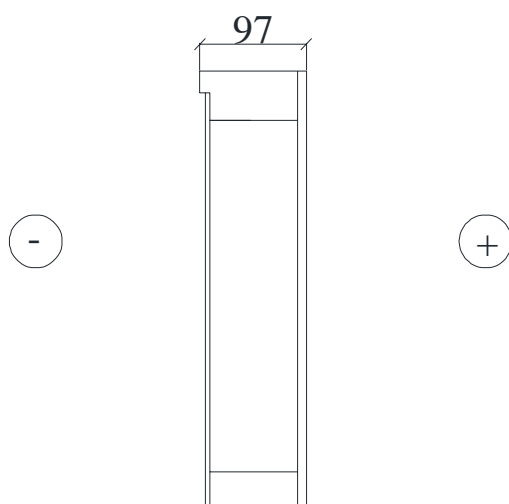
**Kuva 5.8.** Leikkaus Orivent 41- jalustan yläpäästä

### Passiivikupu

Passiivikuvun jalustan rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Sekavaneri 4 mm
- Polyuretaani 80 mm
- Silikaattilevy 8 mm

Jalustan rakenne on kutakuinkin puisten edellä esiteltyjen puisten jalustojen välimalli. Jalustan yläohjauspuu muodostaa pienen ulokkeen rakenteeseen, mutta ei niin merkittävää kuin Orivent 41:ssä. Passiivikuvun jalustan rakenne on esitetty kuvassa 5.9.



**Kuva 5.9.** Passiivikuvun jalustan poikkileikkaus

### 5.3.2 Kansien yksityiskohtia

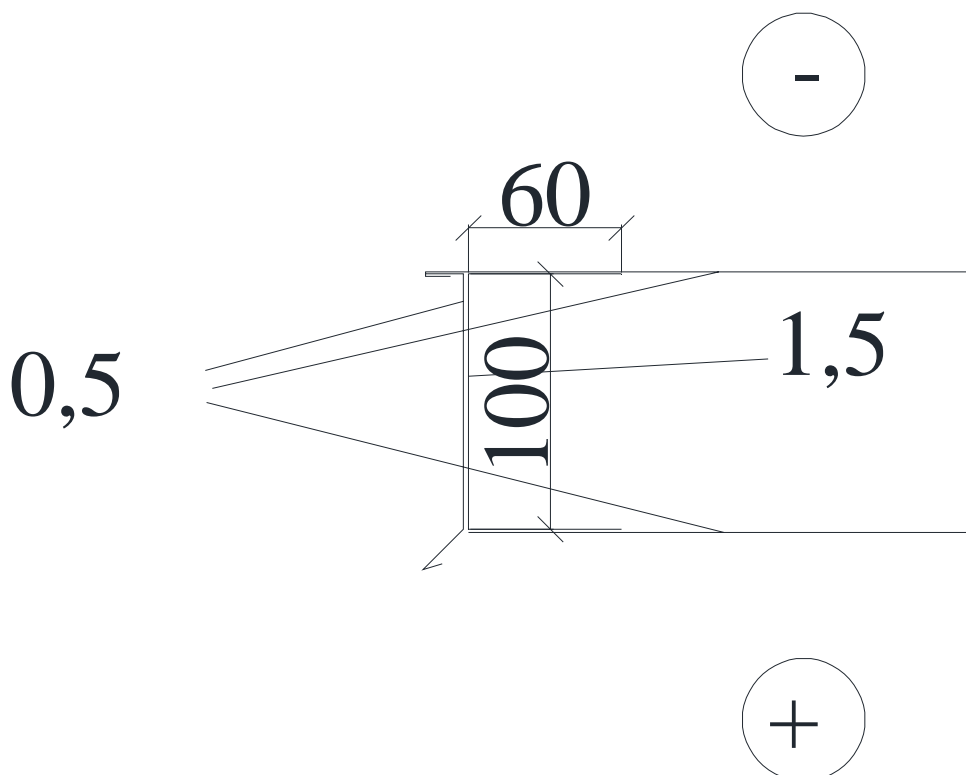
Kuten jalustoissa, on myös luukkujen kansissa pieniä eroja toisiinsa nähden. Neljässä luukussa on läpinäkyvät kannet, jotka ovat jo sinällään erilaisia verrattuna umpinaisiin kansiin, mutta tämän lisäksi läpinäkyvät kannet eroavat myös toisistaan. Umpinaisista kansista kolme on metallirakenteisia, joista kaksi on täysin samanlaista (Orivent 23 ja 31) ja yksi eroaa hieman kahdesta muusta metalliosien sijoittelun suhteen. Yhden luukkumallin kansi on puurakenteinen. Tässä kappaleessa esitellään tarkemmin kansien eroja.

#### Orivent 23 ja 31

Kannen rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Teräsohutlevy 0,5 mm
- Mineraalivilla 100 mm
- Teräsohutlevy 0,5 mm

Kannen keskelle on sijoitettu aiemmin kuvassa 5.1 esitetyn mukainen  $\Omega$ -profiili. Lisäksi kannen reunoilla kulkee U-profiili, joka liittyy 60 mm ulko- ja sisäpellin kanssa sitoen kannen eri pinnat yhteen. Kuvassa 5.10 on esitetty leikkaus kannen reunasta



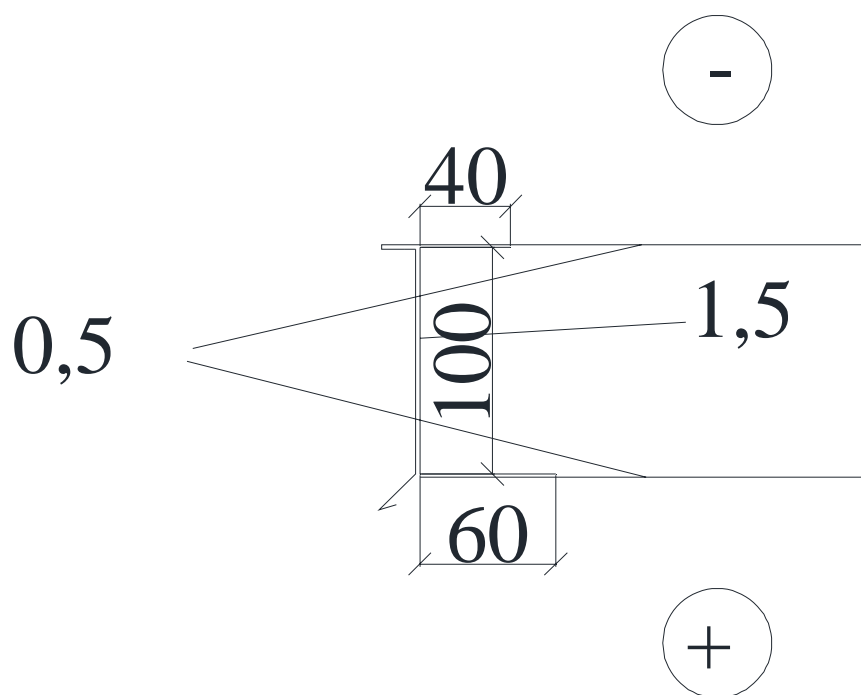
**Kuva 5.10.** Orivent 23 ja 31 kannen reunan poikkileikkaus

## Orivent 52

Kannen rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Teräsohutlevy 0,5 mm
- Mineraalivilla 100 mm
- Teräsohutlevy 0,5 mm

Orivent 52:n kansi on kaksilehtinen. Luukun keskellä kulkee palkki johon kannen puoliskot tukeutuvat. Kuva kannen rakenteesta on esitetty liitteissä. Kannen reunan detalji eroaa Orivent 23:sta ja 31:stä niin, että reunassa kulkee U-profiili, jonka paksuus on 1,5 mm ja se liittyy yläpuolen teräsohutlevyn kanssa 40 mm ja alapuolen pellin kanssa 60 mm. Lisäksi kannessa ei ole erillistä reunapeltiä, vaan yläpuolen pelti taivutetaan kannen ”hupuksi”. Orivent 52 kannen reunan leikkaus on esitetty kuvassa 5.11.



**Kuva 5.11.** Orivent 52 kannen reunan poikkileikkaus.

## Orivent 21

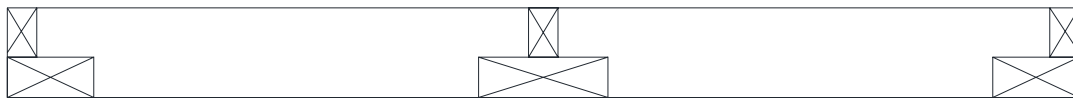
Kannen rakenne ulkoa sisäänpäin:

- Teräsohutlevy 0,5 mm
- Mineraalivilla 100 mm



- Teräsohutlevy 0,5 mm

Kannen tukirakenteen muodostaa puinen kehikko, jonka poikkileikkaus on esitetty kuvassa 5.12. Kannen sisä- ja ulkopinnat muodostuvat 0,5 mm paksuista teräsohutlevyistä, jotka on sijoitettu rakenteeseen samalla tavalla kuten Orivent 23:ssa ja 31:ssä.



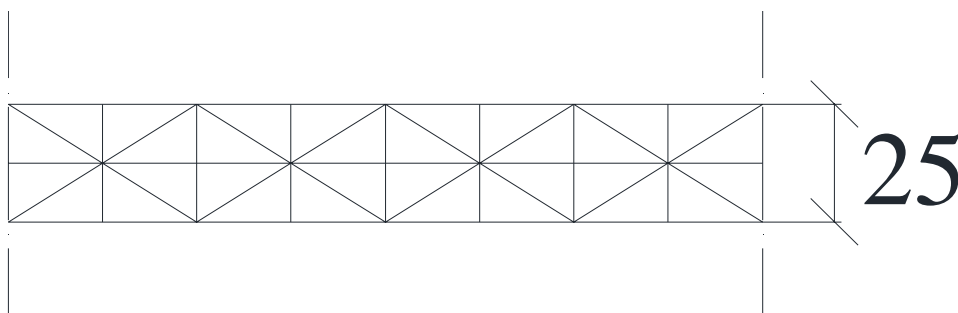
**Kuva 5.12.** Orivent 21 kannessa olevien puuosien sijoitus.

### Orivent 01

Kannen muodostaa kolminkertainen akryylikupu, joka on kiinnitetty puiseen kehykseen. Sisimmäisten läpinäkyvien akryylisten kupujen paksuus on 2,5 mm ja uloimman 4mm. Ilmatilojen paksuus kupujen välillä on 40 mm. Pelkän kuvun U-arvoksi saatiin 1,997 W/(m<sup>2</sup>\*K), joka vastaa  $\lambda$ -arvoa 0,180 W/(m\*K). Laskelmat on esitetty liitteissä.

### Orivent 41

Kannen rakenteen läpinäkyvä osuus muodostuu polykarbonaatista (PC) tehdystä levystä, jonka poikkileikkaus on esitetty kuvassa 5.13. Levyn U-arvoksi valmistaja on ilmoittanut 1,7 W/(m<sup>2</sup>\*K). Lämmönjohtavuudeksi muutettuna tämä tarkoittaa  $\lambda$ -arvoa 0,0425 W/(m\*K)



**Kuva 5.13.** Poikkileikkaus Orivent 41 kannessa käytetystä läpinäkyvästä PC-kennosta.

Kuvassa 5.13 esitetty PC-kenno on kiinni puisessa kehikossa, jotka yhdessä muodostavat Orivent 41 kannen.

### **Orivent 51 ja 51L**

Orivent 51L:n kansi muodostuu lasipaketista, jossa on kolme lasikerrosta ja argonia lasikerrosten välissä. Lasipaketin kerrokset sisältä ulospäin ovat seuraavat:

- 4+4 mm laminoitu lasi
- 15 mm argon-täyte
- 4 mm float lasi
- 15 mm argon-täyte
- 6 mm selektiivilasi

Lasipaketti on kiinnitetty metallisista umpiprofiileista koostuvaan kehykseen, joka on noin 30° kulmassa vaakatasoon nähden. Umpiprofiilien seinämänpaksuus on 2 mm ja niiden poikkileikkaus vaihtelee, suurimman ollessa 32 mm \* 72 mm ja pienimmän 42 mm \* 12 mm. Lasipaketin U-arvoksi saatiin 1,132 W/(m<sup>2</sup>\*K), joka vastaa λ-arvona 0,054 W/(m\*K). Laskelmat on esitetty liitteissä. Orivent 51:n kannen reunan detalji on samanlainen kuin Orivent 23:ssä ja 31:ssä, kuten kuvassa 5.10 on esitetty.

### **Passiivikupu**

Passiivikuvun kansi muodostuu akryylikuvusta ja kolminkertaisesta lasipaketista. Lasipaketin kerrokset sisältä ulospäin ovat seuraavat:

- 3+3,2 mm laminoitu lasi
- 12 mm argon-täyte
- 4 mm selektiivilasi
- 12 mm argon-täyte
- 4 mm selektiivilasi

Lasipaketin U-arvoksi saatiin 1,023 W/(m<sup>2</sup>\*K), joka vastaa λ-arvona 0,039 W/(m\*K). Laskelmat on esitetty liitteissä.

## **5.4 Käytetyt laskentamallit**

Laskentamallilla tarkoitetaan geometrista mallia, jolla rakenteen U-arvo on laskettu. Laskentamalli rakennetaan niin, että se kuvaisi mahdollisimman tarkasti todellista rakennetta. Käytännössä tietokoneen suoritusteho, rakenteiden toleranssit ja muut käytännön seikat aiheuttavat sen, että laskentamalli on aina enemmän tai vähemmän idealisoitu malli.

### 5.4.1 Elementtiverkko

Elementtiverkon valinta on yksi tärkeimmistä toimenpiteistä käytettäessä elementtimenetelmään perustuvaa ongelmanratkaisua. Elementtiverkko muodostuu elementeistä, joiden avulla voidaan generoida ongelman ratkaisu. Elementtiverkko vaikuttaa muun muassa ratkaisun tarkkuuteen, laskenta-aikaan ja niin sanottuun mallinnusvirheeseen, joka tarkoittaa virhettä analyttisen ja numeerisen ratkaisun välillä.

Yleisellä tasolla elementtimenetelmässä käytetyt elementit voidaan jaotella viiva, verkko, pinta-ala ja tilavuuselementteihin. Verkkoelementtejä voi olla yksi-, kaksi- tai kolmeulotteisia ja kaksiulotteiset verkot voivat olla joko kaksi- tai kolmeulotteisessa avaruudessa. Elementeissä olevat pinnat ja viivat solmupisteiden välillä voivat olla tasomaisia tai yksinkertaisia kaaria [26].

Comsolissa käytetään pääsääntöisesti tilavuuselementtejä 3D malleissa, pintaelementtejä 2D malleissa ja viivaelementtejä 1D mallissa. Elementtiverkot Comsolissa ovat muotoamuuttavia ja niiden muodonmuutos voi tapahtua deformaatiolla kappaleen deformaation mukana tai kappaleen materiaalia lisäämällä tai poistamalla. Kappaleen mukana deformoituva verkko soveltuu tarkasteluihin, jossa kappale muuttaa muotoaan fysiikkaisten vuorovaikutusten johdosta. Esimerkkinä tästä on teräspalkin deformaation kuormituksen alaisena. Verkotusmetodi, jossa tarkasteltavaan kappaleeseen lisätään tai poistetaan materiaalia, soveltuu tarkasteluihin, joissa tutkitaan kappaleen muodon vaikutusta tutkittavaan ongelmaan, esimerkiksi teräspalkin poikkileikkauksen valinta tiettyyn kuormitustapaukseen [23].

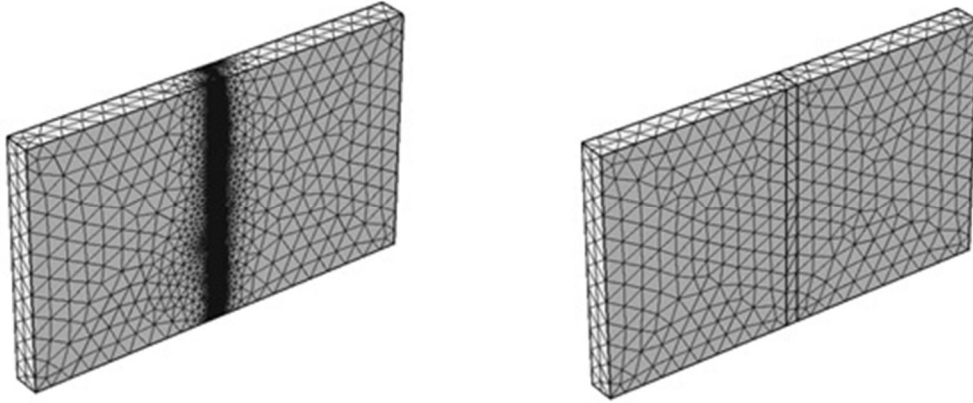
Comsolissa käytettävien tavanomaisten elementtiverkkojen silmukat ovat 2D tapauksissa joko kolmioita tai nelikulmioita. 3D tapauksissa silmukat ovat joko neli- tai kuusitahkoisia tilavuusobjekteja, prismoja tai pyramideja [23, s. 940-941].

Savunpoistoluukkujen ja kattokupujen laskennassa käytettiin hienointa mahdollista verkkoa. Verkotuksen rajoituksena oli yleensä tietokoneen muisti. Erityisesti rakenteissa, joissa oli paljon kulmia ja muita pikkutarkkoja yksityiskohtia, verkosta tuli hyvin tiheä ja näin ollen raskas. Tällaisissa tilanteissa mallia yksinkertaistettiin, jolloin laskenta pystyttiin suorittamaan.

### 5.4.2 Geometria

Laskennassa käytetyt rakenteet mallinnettiin pääosin SolidWorksilla. SolidWorks malleja ei kuitenkaan pystynyt kaikilta osin hyödyntämään laskennassa vaan jotain muutoksia täytyi tehdä.

Monissa luukuissa käytetään peltiä, jonka paksuus vaihtelee välillä 0,5 - 1,5 mm. Tällaiset osat tekevät verkonluonnista raskaan, minkä seurauksena tietokoneen muisti voi loppua kesken verkotuksessa. Tämä ilmiö käy esille kuvasta 5.14.



**Kuva 5.14.** Kuvassa seinänosa, jossa keskellä 0,7 mm paksu Z-profiili. Kuvan vasemmassa laidassa Z-profiili on mallinnettu todellisena rakenteena ja kuvan oikeassa laidassa Z-profiili on mallinnettu highly conductive layerina.

Kuvassa 5.14 on mallinnettu 1 m seinää, jonka paksuus on 70 mm ja korkeus 600 mm Comsolin. Seinän keskikohdalla on Z-profiili, jonka paksuus on 0,7 mm. Molemmissa tapauksissa on käytetty fysiikan mukaan määräytyvää verkkoa, joka on elementtikooltaan kolmanneksi tihein ("finer") esimääritellyistä verkoista. Kuvan vasemmassa laidassa rakenteen keskiosassa oleva Z-profiili on mallinnettu 0,7 mm paksuna tilavuusobjektina, jolloin tarkasteltavaan rakenteeseen tuli yhteensä 186 473 elementtiä. Kuvan oikeassa laidassa on mallinnettu samanlainen seinä, mutta Z-profiili on mallinnettu pinta-alaobjektina. Tällöin mallinnettavaan rakenteeseen muodostui yhteensä 3 688 elementtiä.

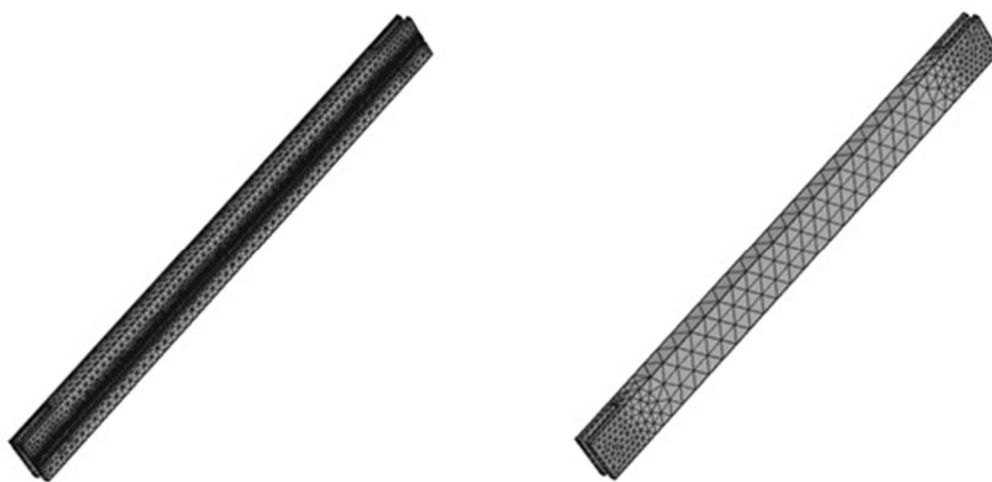
Kuvan vasemmassa laidassa olevassa tilanteessa Z-profiili merkittiin jälkikäteen hyvin lämpöä johtavaksi kerrokseksi ("Highly conductive layer"). Kyseisessä toiminnossa pinta-ala objektille syötetään erikseen kerroksen paksuus, lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti. Tämän toimenpiteen seurauksena Comsol korvaa lämmön johtumista käsittelevän termin kerroksen kohdalla kaavasta 5.2 kaavaksi 5.5 [25].

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = d_s \left( Q_s - \rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \nabla_t \cdot (d_s k_s \nabla_t T) \quad (5.5)$$

missä,

$\mathbf{n}$	on	pinnan normaalivektori [-]
$d_s$	on	kerroksen paksuus [m]
$C_s$	on	kerroksen ominaislämpökapasiteetti [J/(kg*K)]
$k_s$	on	kerroksen lämmönjohtavuus [W/(m*K)]

Laskentamalleissa on tehty joitakin geometrian yksinkertaistuksia. Tästä erimerkkinä on usean luukun kansiosassa käytetty lauta, jonka geometria on varsin monimutkainen (kuva 5.15)



**Kuva 5.15.** Kuvassa kaksi pääpiirteittäin samanlaista lautaa, joista oikeanpuolimmaisesta poistettu viisteitä. Tällä toimenpiteellä vapautetaan muistia rakenteen muiden osien verkotukseen.

### 5.4.3 Materiaaliominaisuudet

Laskennassa käytetyt materiaaliarvot on otettu standardeista SFS EN 12524, EN ISO 10077-2, EN 673, valmistajan tuotteen CE-merkinnöistä tai muusta aiheeseen liittyvästä kirjallisuudesta. Laskennassa käytetyt materiaaliarvot on esitetty taulukossa 5.2. Comsol tarvitsee laskentaa varten tiedot materiaalin lämmönjohtavuudesta, tiheydestä ja ominaislämpökapasiteetista vakio paineessa. Koska U-arvoa laskettaessa tutkitaan stationääristä tilaa, ei materiaalin tiheydellä tai ominaislämpökapasiteetilla ole merkitystä lopputulokseen. Ohjelma kuitenkin tarvitsee tiedot jotta laskenta voidaan suorittaa kaavan 5.2 mukaisesti.

**Taulukko 5.2.** Laskennassa käytettyjen materiaalien materiaaliarvoja.

Materiaali	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/(kg*K)]	Lämmönjohtavuus [W/(m*K)]
Puu	450	1600	0,12
Teräs	7800	450	50
Polyuretaani	35	1800	0,023
Mineraalivilla	50	800	0,036
EPDM kumi	1150	1000	0,25
Lasi	2500	750	1
Akryyli	1050	1500	0,2

Tutkittaessa rakenteissa olevia onteloita tarvittiin lisäksi tietoa materiaalien emissiivisyyksistä. Pääosin ontelot olivat puusta, alumiinista tai teräksestä. Lisäksi lasi- ja läpinäkyvien osien U-arvon laskennassa tarvittiin materiaalien emissiivisyyksistä. Taulukossa 5.3 on esitetty laskennassa käytettyjä emissiivisyyksiä.

**Taulukko 5.3.** Laskennassa käytettyjen materiaalien emissiivisyyksiä.

Materiaali	Emissiivisyys
Alumiini	0,3
Teräs	0,27
Puu	0,9
Akryyli	0,84
Lasi	0,837
Selektiivikalvo	0,037

Lasikerrosten välissä käytetyssä täytekaasussa pääsee tapahtumaan konvektiota, mikä otetaan huomioon Nusseltin luvun avulla. Nusseltin luku lasketaan Prandlin ja Grashofin luvun avulla, mihin lähtötietoina tarvitaan kaasun lämmönjohtavuus, tiheys, dynaaminen viskositeetti ja ominaislämpökapasiteetti. Taulukossa 5.4 on esitetty edellä mainittuja suureita laskennassa käytetyille materiaaleille.

**Taulukko 5.4.** Laskennassa käytettyjen kaasujen materiaaliarvoja [17, taulukko1].

Materiaali	Lämmönjohtavuus [W/(m*K)]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Dynaaminen viskositeetti [kg/(m*s)]	Ominaislämpökapasiteetti [J/(kg*K)]
Argon	0,01734	1,64	$2,228 \cdot 10^{-5}$	519
Ilma	0,02496	1,232	$1,761 \cdot 10^{-5}$	100

Taulukossa 5.4 esitetyt arvot pätevät 10°C lämpötilassa. Standardin EN 673 mukaan materiaaliarvoina tulee käyttää juuri tässä lämpötilassa voimassaolevia arvoja [17, s. 11].

## 6 LASKENTATULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

Standardien selvityksen perusteella päädyttiin käyttämään luukkujen ulkomittoja U-arvon määrittämisessä. Valinnasta pidetään kiinni koko laskennan ajan, koskien myös viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaa. Kuten jo työn alussa todettiin pintalamamääritykset voivat vaihdella maakohtaisesti, jolloin tulokset eivät ole vertailukelpoisia kaikkien maiden määrittämisosalta. Valitsemalla ulkopinta tarkasteltavaksi pintalaksi toteutetaan kuitenkin standardien ehdot, joiden mukaan valitusta mittajärjestelmästä tulee pitää kiinni koko laskennan ajan

Tarkasteltavat luukut päätettiin mallintaa ja laskea kokonaisina rakenteina, jolloin saatiin tarkin mahdollinen laskennallinen U-arvo. Lisäksi luukut jaettiin kansiosaan ja jaluustaan, jotka mallinnettiin erikseen, jolloin pystyttiin tutkimaan paremmin luukkujen rakenteiden yksityiskohtia. Kappaleen lopussa on lisäksi esitetty tuloksia käsinlaskennasta ja rakennemallin erilaisesta paloittelusta. Tuloksia tarkasteltaessa on pidettävä mielessä, että U-arvot pätevät tarkastelluille rakenteille. Luukun koon muuttuessa tukirakenteiden ja lämmöneristeen pinta-alojen osuus muuttuu, minkä johdosta myös U-arvo muuttuu.

### 6.1 Tulokset kokonaisten luukkujen laskentamalleista.

Tässä kappaleessa esitetyt tulokset ovat tarkasteltujen rakenteiden viralliset tulokset. Ne perustuvat kokonaisten luukkujen laskentamalleihin, joiden avulla U-arvo voitiin laskea numeerisesti standardin EN ISO 10211 mukaan. Taulukossa 6.1. on esitetty tutkittujen rakenteiden viralliset U-arvot määritettynä rakenteen tehokkaiden ulkopintojen mukaan. Pinta-alojen määrittästä käsiteltiin kappaleessa 4.

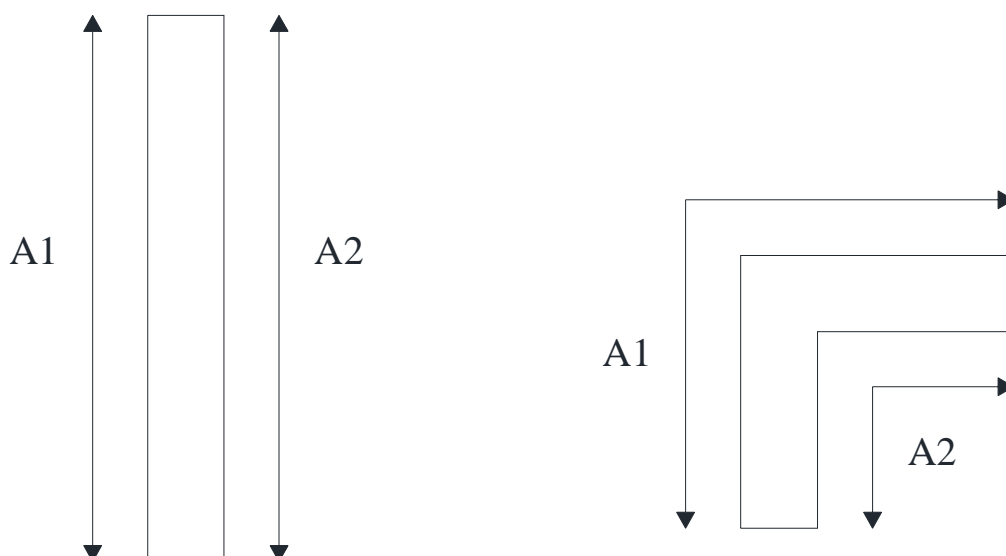


**Taulukko 6.1.** Tutkittujen rakenteiden viralliset U-arvot laskettuna rakenteen ulkomitojen mukaan kokonaisen luukun laskentamallista.

	Koko luukun U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Rakenteen ulkopinnan pinta-ala määritettynä prEN 1873 mukaan [m <sup>2</sup> ]
Orivent 01	0,81	5,38
Orivent 21	0,50	5,22
Orivent 23	0,92	4,49
Orivent 31	1,27	4,55
Orivent 41	0,85	4,88
Orivent 51	1,22	6,28
Orivent 51L	1,26	6,28
Orivent 52	1,63	5,39
Passiivikupu	0,58	3,58

Taulukosta huomataan, että metallirakenteisilla luukuilla on suurimmat U-arvot, kun taas vastaavasti puurakenteisilla luukuilla on pienimmät U-arvot. Suurin U-arvo on metallirakenteisella kaksilehtisellä luukulla (Orivent 52) ja pienin U-arvo Orivent 21-luukulla, jossa on puiset tukirakenteet sekä umpinainen kansi.

Tuloksia tarkasteltaessa on pidettävä mielessä, että U-arvot on ilmoitettu ulkopinnan pinta-alan mukaan. Tämän seurauksena U-arvot ovat pienempiä kuin ilmoitettuna sisäpinnan mukaan. Tämä johtuu siitä, miten U-arvo määritellään. U-arvossa rakenteen läpi johtuva lämpöhäviö jaetaan rakenteen pinta-alalle. Yksiulotteisissa tapauksissa ei näin ollen ole väliä kumpaa pintaa käytetään, mutta kaksi- ja kolmiulotteisissa tapauksissa pinta-alojen määrittäminen vaikuttaa U-arvoon, kuten kuvassa 6.1 on esitetty.



**Kuva 6.1.** Esimerkkikuva yksiulotteisen ja kaksiulotteisen objektien pinta-aloista. Kuvan vasemmassa laidassa on yksiulotteinen objekti, jossa pinta-alat ovat samat määritettynä ulko- tai sisäpinnan mukaan. Kuvan oikeassa laidassa on kaksiulotteinen objekti, jossa ulkopinnan mukaan määritetty pinta-ala on suurempi kuin sisäpinnan mukaan määritetty.

Käytettäessä rakenteen sisämittoja rakenteen lämpöhäviö jaetaan pienemmälle pinta-alalle kuin käytettäessä rakenteen ulkomittoja, minkä johdosta  $U$ -arvot kasvavat. Taulukossa 6.2 on esitetty tutkittujen rakenteiden  $U$ -arvot käyttäen pinta-alana rakenteen sisäpintoja.

**Taulukko 6.2.** Tutkittujen rakenteiden  $U$ -arvot koko luukun laskentamallista käytettäessä rakenteen sisämittoja.

	Koko luukun $U$ -arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Rakenteen sisäpinnan pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
Orivent 01	1,05	4,18
Orivent 21	0,65	4,00
Orivent 23	1,21	3,40
Orivent 31	1,68	3,44
Orivent 41	1,04	3,98
Orivent 51	1,57	4,89
Orivent 51L	1,62	4,89
Orivent 52	2,02	4,34
Passiivikupu	0,78	2,66

Taulukosta 6.2 huomataan, että metallisilla luukuilla on edelleenkin suurin U-arvo ja U-arvot kasvavat keskimäärin noin 30 % pinta-alavaihdoksen johdosta.

Kaikissa luukuissa on tukirakenteita, joiden lämmönjohtavuus eroaa lämmöneristeen lämmönjohtavuudesta. Näin ollen tukirakenteet aiheuttavat paikallisia kylmäsiltoja, jotka puolestaan heikentävät koko luukun U-arvoa. Taulukossa 6.3 on esitetty metallirakenteisten luukkujen U-arvot ilman metallisia tukirakenteita.

**Taulukko 6.3.** Metallirakenteisten luukkujen U-arvot ilman metallisia osia.

	Koko luukun U-arvo ilman teräsosia [W/(m <sup>2</sup> *K)]
Orivent 23	0,36
Orivent 31	0,36
Orivent 51	0,35
Orivent 51L	0,59
Orivent 52	0,41

Taulukosta 6.3 huomataan, että luukkujen U-arvot ovat luokkaa 0,36 W/(m<sup>2</sup>\*K). Orivent 51L:n suurempi U-arvo selittyy kansiosan lasipaketin vaikutuksella ja Orivent 52:n U-arvoon vaikuttaa puolestaan luukun keskellä kulkeva tukipalkki. Orivent 51:llä oli kaikista pienin U-arvo, mikä selittyy luukun jalustassa käytetyllä suurella eristepaksuudella. Tuloksista voidaan havaita, että metalliosien vaikutus rakenteen U-arvoon on keskimäärin noin 200 %, vaihdellen välillä 112...296 % luukutyypistä riippuen. Suurin muutos on Orivent 52 -luukussa, jossa on eniten metallisia osia. Vastaavasti pienin muutos on Orivent 51L:ssä, jossa lasisen kansiosan vaikutus pienentää metalliosien suhteellista vaikutusta.

Taulukossa 6.4 on esitetty puurakenteisten luukkujen U-arvot ilman puisia tukirakenteita.

**Taulukko 6.4.** Puurakenteisten luukkujen U-arvot ilman puusia osia.

	Koko luukun U-arvo ilman puuosia [W/(m <sup>2</sup> *K)]
Orivent 01	0,70
Orivent 21	0,35
Orivent 41	0,65
Passiivikupu	0,44

Taulukosta 6.4 huomataan, että luukkujen U-arvot ilman puuosia vaihtelevat enemmän kuin luukkujen arvot ilman teräsosia taulukossa 6.3. Tämä johtuu siitä, että suurimmassa osassa puurakenteisista luukuista oli läpinäkyvä kansi, joihin puurakenteiden poistaminen ei suoranaisesti vaikuttanut. Ainoastaan Orivent 21:ssä oli umpinainen kansi, johon näin ollen puurakenteiden poisto vaikutti. Tuloksista huomataan, että puurakenteiden vaikutus luukkujen U-arvoon on keskimäärin noin 30 %, vaihdellen välillä 16...43 %. Suurin muutos U-arvoissa on Orivent 21:ssä, jossa puuosia on merkittävästi myös kannen rakenteissa. Myös Passiivikuvulla puurakenteiden vaikutus on merkittävän suuri, mikä selittyy sillä että puurakenteet muodostavat merkittävämpiä kylmäsiltoja rakenteeseen, jossa on muutoin suuri lämmönvastus. Pienin vaikutus puuosilla oli Orivent 01:ssä, jossa kannen kupuosan kautta tapahtuu merkittävä osuus luukun lämpöhäviöistä.

## 6.2 Tulokset kannen ja jalustan laskentamalleista

Luukkujen rakenteet ovat pitkälti toistensa kaltaisia, mutta kuten jo aiemmin todettiin, on luukkujen detaljeissa eroja, jotka näkyvät myös rakenteen osien U-arvoissa. Kun rakenne jaettiin kahteen osaan (jalusta ja kansi) pystyttiin paremmin tutkimaan rakenteen yksityiskohtia johtuen mallintamisen tarkkuudesta ja elementtiverkon tiheämmästä jaosta. Taulukossa 6.5 on esitetty yksittäisten rakenteenosien U-arvot.

**Taulukko 6.5.** Tarkasteltujen rakenteiden kansien ja jalustojen U-arvot.

	Jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Kannen U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]
Orivent 01	0,56	1,67
Orivent 21	0,57	0,87
Orivent 23	1,29	1,82
Orivent 31	1,37	1,82
Orivent 41	0,55	1,60
Orivent 51L	0,77	1,60
Orivent 52	1,44	2,00
Passiivikupu	0,41	1,10

### 6.2.1 Metallisten yksityiskohtien vaikutus U-arvoihin

Kuten luvusta 4.3.1 todettiin, Orivent 52 jalusta voidaan toteuttaa myös kahdella  $\Omega$ - ja kahdella Z-profiililla. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että toinen  $\Omega$ -profiileista muuttuu Z-profiiliksi, jolloin jalustan U-arvo muuttuu arvosta 1,44 W/(m<sup>2</sup>\*K) arvoon 1,39 W/(m<sup>2</sup>\*K).

Kun tarkastellaan Orivent 52:n jalustaa kahdella Z-profiililla, huomataan, että jalusta on muuten samanlainen kuin Orivent 31 jalusta, mutta sisäpuolen teräsohutlevy on 0,2 mm paksumpi eikä jalusta ole kalteva. Kaltevuudella on pieni merkitys U-arvoon koska se muuttaa hieman teräsohutlevyjen ja lämmöneristeen suhdetta, mutta se voidaan olettaa merkityksettömäksi. Orivent 31-jalustan U-arvoksi saatiin 1,37 W/(m<sup>2</sup>\*K), mistä huomataan, että sisäpuolen pellin vaihtaminen 0,5 mm:stä 0,7 mm:n nostaa U-arvoa noin 0,02 yksikköä, joten merkitys ei ole kovin suuri.

Verrattaessa Orivent 31:stä ja Orivent 23:sta keskenään huomataan, että ainut ero luukujen välillä on jalustan yläpään erilainen rakenne. Orivent 23:n yläpää muodostuu ulkopuolen 0,7 mm paksusta ulkopelistä, kun taas Orivent 31:n yläpäässä kulkee 1,5 mm paksu U-profiili, joka liittyy sisä- ja ulkopuolen pellin kanssa. Tämän seurauksena Orivent 23- jalustan U-arvo on 1,29 W/(m<sup>2</sup>\*K) kun taas Orivent 31- jalustan U-arvo on 1,37 W/(m<sup>2</sup>\*K).

Kansien osalta Orivent 23:ssa ja 31:ssä on samanlaiset kannet, mutta Orivent 52:ssa on erilainen. Orivent 52:n kansi on kaksilehtinen ja luukun keskellä kulkee tukipalkki, johon kansi tukeutuu. Tämän lisäksi kannen reunan detalji on erilainen, kuten aiemmin todettiin luvussa 5.3.2. Orivent 52:n kannen reunassa on vähemmän metallia, mikä siinä parantaa U-arvoa, mutta kannen kesipalkki vaikuttaa tulokseen voimakkaasti, minkä johdosta Orivent 52:n kannen U-arvo on 2,00 (W/m<sup>2</sup>\*K) kun taas Orivent 31:ssä ja 23:ssa kannen U-arvoksi tulee 1,82 (W/m<sup>2</sup>\*K).

Orivent 51-jalustalle saatiin metallisista jalustoista kaikista pienin U-arvo, mikä selittyy pääosin suurella eristepaksuudella.

### 6.2.2 Puisten yksityiskohtien vaikutus U-arvoihin

Puisista luukuista ainoastaan Orivent 21:ssä on umpinainen kansi, mikä selittää pääosin sen alhaisimman U-arvon. Orivent 21:ssä on peltiä sisä- ja ulkopinnoilla, mutta ne eivät pääse yhdistymään keskenään, mikä ansiosta kylmäsilta-vaikutus ei ole yhtä suurta kuin metallisissa luukuissa. Kaikkien puisten luukkujen jalustat ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa, lukuun ottamatta Passiivikupua, jonka jalustassa käytettiin 80 mm paksumaa polyuretaanieristettä. Pienet erot Orivent 01, 21 ja 41 jalustojen U-arvoissa selittyvät pienillä detaljieroilla joita on käsitelty kappaleessa 5.3.1.

Läpinäkyvien kansien osalta huomataan, että passiivikuvulla on kaikista pienin U-arvo, mikä selittyy kannessa käytetyn lasipaketin hyvällä lämmöneristyskyvyllä. Passiivikuvun lasipaketin U-arvoksi saatiin  $1,023 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Toiseksi paras U-arvo läpinäkyvien kansien osalta löytyy Orivent 41 kannesta, jossa läpinäkyvän osan muodosti PC-kenno, jonka U-arvoksi valmistaja on ilmoittanut  $1,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Laskelmien perusteella Orivent 01:n kannessa oli läpinäkyvistä kansista suurin U-arvo. Kyseisen luukun kansi muodostui kolminkertaisesta akryylikuvusta, jonka U-arvoksi saatiin  $1,997 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , joka kuitenkin alittaa Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 kattovalokuvun enimmäisarvon  $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [28, s.11].

Orivent 01 voidaan toteuttaa kiinteällä jalustalla, mikä tarkoittaa, että kupua ei voida avata vaan se on kiinni suoraan jalustassa. Rakenteellisesti tämä tarkoittaa sitä, että jalustan yläohjauspuun tilalle tulee suoraan kannen puukarmit. Tämän seurauksena jalustan U-arvoksi tulee  $0,51 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

### 6.2.3 Metallisten osien vaikutus kannen ja jalustan U-arvoihin

Metallisten osien poikkipinta-alat eivät ole rakenteissa suuria, sillä paksuimman metallisen tukirakenteen paksuus on 2,0 mm ja ohuimman 0,5 mm. Metallisten osien merkittävä vaikutus perustuukin niiden lämmönjohtavuuteen, joka on noin 1400 kertaa suurempi kuin suurimmassa osassa rakenteissa käytetyn mineraalivillan lämmönjohtavuus.

Taulukossa 6.6 on vertailtu todellisten rakenteiden U-arvoja ja ideaalisten rakenteiden U-arvoihin. Tässä yhteydessä ideaalisella rakenteella tarkoitetaan rakennetta, jossa ei ole tukirakenteita. Käytännössä tämä tarkoittaa rakenteita, jotka koostuvat lämmöneristeestä ja teräsohutellevyistä pinnoilla.

**Taulukko 6.6.** Taulukossa esitetty U-arvoja rakennemalleista, joista on poistettu kaikki metalliset osat, jotka ulottuvat sisäpuolelta ulkopuolelle. Lisäksi kyseisiä U-arvoja on verrattu rakenteiden virallisiin U-arvoihin.

	Ideaalisen kannen U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Ideaalisen jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Muutos kannen U-arvossa [%]	Muutos jalustan U-arvossa [%]
Orivent 23	0,35	0,43	428,49	198,97
Orivent 31	0,35	0,43	428,49	218,34
Orivent 52	0,80	0,43	150,78	233,99

Taulukosta 6.6 huomataan, että metalliset tukirakenteet kasvattavat rakenteenosien U-arvoja noin 150...430 %, mikä on merkittävä muutos U-arvoissa. Taulukosta huomataan, että muutos jalustan U-arvossa on suurempi Orivent 31 kuin Orivent 23, mikä selittyy Orivent 31 paksummalla teräsohutlevykerroksella jalustan yläpäässä. Orivent 52 kohdalla huomataan, että muutos ideaalirakenteen ja todellisen rakenteen välillä on pienempää verrattuna Orivent 23 ja Orivent 31, kun tarkastella kannen U-arvoja. Tämä selittyy pääosin Orivent 52 kaksilehtisestä kansirakenteella ja tukipalkilla kannen keskellä, mikä kannattelee kantta. Tukipalkista aiheutuvan kylmäsiirtovaikutuksen johdosta muiden metallisten rakenteiden aiheuttama kylmäsiirtovaikutus ei ole suhteellisesti niin suuri kuin Orivent 23:ssa ja 31:ssä. Toisaalta Orivent 52:n jalustassa on tarkastelluista jalustoista suurin muutos. Tämä selittyy Orivent 52-jalustan rakenteella, missä on kolme  $\Omega$  -profiilia ja vain yksi Z-profiili.

Karkealla tasolla voidaan sanoa, että metalliset tukirakenteet yhdistävät ulko- ja sisäpinna metallisten tolppien välityksellä, ja ylä- sekä alareunan profiilin tai teräsohutlevyn välityksellä. Taulukossa 6.7 on tutkittu tilannetta, jossa rakenteissa on ainoastaan metalliset tolpat, mutta ei teräsohutlevyjä rakenteiden reunoilla.

**Taulukko 6.7.** Taulukossa esitetty U-arvoja rakennemalleista, joista on poistettu rakenteiden reunoilla kulkevat metalliset osat, jotka ulottuvat sisäpuolelta ulkopuolelle. Lisäksi kyseisiä U-arvoja on verrattu rakenteiden virallisiin U-arvoihin.

	Kannen U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Muutos kannen U-arvossa [%]	Muutos jalustan U-arvossa [%]
Orivent 23	0,90	0,86	102,83	50,04
Orivent 31	0,90	0,85	102,83	60,79
Orivent 52	1,15	1,01	73,83	42,08

Taulukosta 6.7 huomataan, että Orivent 31:ssä on suurin muutos sekä kannen että jalustan U-arvoissa. Tämä tarkoittaa sitä, että kyseisestä rakenteesta johtuu enemmän lämpöenergiaa reunojen teräsohutlevyjen välityksellä kuin Orivent 52:ssa ja 23:ssa. Tämä selittyy pitkälti jalustan yläreunassa kulkevan 1,5 mm paksun profiilin vaikutuksella. Orivent 52:ssa on samanlainen profiili, mutta jalustan ylimääräinen  $\Omega$ -profiili ja kannen tukipalkki vähentävät reunaprofiilien suhteellista painoarvoa lämmönjohtumisessa.

Taulukossa 6.8 on esitetty rakenteet, joissa ei ole metallisia tolppia vaan ainoastaan sisä- ja ulkopuolen teräsohutlevyt sekä ylä- ja alareunan metalliset osat. Toisin sanoen metalliset osat muodostavat ”vaipan” rakenteen ympärille.

**Taulukko 6.8.** Taulukossa esitetty U-arvoja rakennemalleista, joista on poistettu rakenteissa olevat metalliset tolpat, jotka ulottuvat sisäpuolelta ulkopuolelle. Lisäksi kyseisiä U-arvoja on verrattu rakenteiden virallisiin U-arvoihin.

	Kannen U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Muutos kannen U-arvossa [%]	Muutos jalustan U-arvossa [%]
Orivent 23	1,32	0,92	37,88	39,86
Orivent 31	1,32	0,99	37,88	37,87
Orivent 52	1,66	0,97	20,57	48,58

Taulukosta 6.8 huomataan, että lähes kaikkien tarkasteltujen luukkujen osien muutos alkuperäiseen U-arvoon on hieman pienempi mitä taulukossa 6.7 esitetyillä arvoilla. Tämä tarkoittaa sitä, että reunojen teräsohutlevyjen kautta johtuu enemmän lämpöä kuin teräksisten tolppien kautta. Kun verrataan taulukoita 6.8 ja 6.7 keskenään huomataan, että suurin ero luukunosien U-arvon muutoksessa on Orivent 31:ssä. Tämä kertoo siitä, että Orivent 31:ssä tapahtuu suurempi osa johtumislämpöhäviöistä reunoilla kulkevien teräsohutlevyjen välityksellä kuin metallisten tolppien välityksellä. Orivent 52:ssa on havaittavissa samansuuntainen ilmiö, muuta jalustalla oleva ylimääräinen  $\Omega$ -profiili tasoittaa hieman eroja.



Miltei jokaisessa teräksisessä luukussa teräsosat liitetään toisiinsa limittämällä. Limityksestä aiheutuu paikallinen paksu teräskerros, joka myös loogisesti johtaa enemmän lämpöenergiaa. Taulukossa 6.9 on esitetty rakenteet, joissa ei ole huomioitu reunojen limityksiä ollenkaan. Ainoastaan teräksisten tolppien ja sisä- sekä ulkopintojen teräsohutlevyjen limityskohdat on huomioitu.

**Taulukko 6.9.** Taulukossa esitetty U-arvoja rakennemalleista, joista on poistettu kaikki peltien limitykset. Lisäksi kyseisiä U-arvoja on verrattu rakenteiden virallisiin U-arvoihin.

	Kannen U-arvo ilman limityksiä [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Jalustan U-arvo ilman limityksiä [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Muutos kannen U-arvossa [%]	Muutos jalustan U-arvossa [%]
Orivent 23	1,49	1,26	22,68	2,42
Orivent 31	1,49	1,31	22,68	4,91
Orivent 52	1,69	1,41	18,77	1,74

Taulukosta 6.9 huomataan, että limitysten vaikutus ei ole kovinkaan merkittävä verrattuna muiden metallisten osien vaikutukseen. Suurimmillaan se on Orivent 31:ssä, jossa se nostaa kannen U-arvoa noin 23 % ja jalustan U-arvoa noin 5 %.

Myös puurakenteisissa luukuissa oli metallisia osia, mutta niiden vaikutus ei näy juurikaan rakenteiden U-arvoissa, koska ne eivät ulotu sisäpuolelta ulkopuolelle.

#### 6.2.4 Puisten osien kannen ja jalustan U-arvoihin

Puolessa tutkituista rakenteista käytetään puuta rakenteen rungossa. Puisten tolppien poikkileikkaukset olivat huomattavasi suurempia kuin metallisten osien, mutta puun lämmönjohtavuuskaan ei ole kuin reilut kolme kertaa mineraalivillaa suurempi.

Taulukossa 6.10 on esitetty puurakenteisten luukunosien U-arvoja ilman puuosia ja verrattu niitä rakenteenosiin, joissa on puuosat. Kansien osalta ideaalirakennetta on tutkittu ainoastaan Orivent 21-luukun kohdalla, jossa on umpinainen kansi. Muissa luukuissa käytetään läpinäkyviä kansiä, joissa ei ole puu osia ollenkaan karmien lisäksi.

**Taulukko 6.10.** Taulukossa esitetty U-arvoja rakennemalleista, joista on poistettu kaikki puiset osat, jotka ulottuvat sisäpuolelta ulkopuolelle. Lisäksi kyseisiä U-arvoja on verrattu rakenteenosien virallisiin U-arvoihin.

	Ideaalisen kannen U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Ideaalisen jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Muutos kannen U-arvossa [%]	Muutos jalustan U-arvossa [%]
Orivent 01	-	0,41	-	35,65
Orivent 21	0,57	0,42	53,42	34,86
Orivent 41	-	0,42	-	30,92
Passiivikupu	-	0,24	-	71,12

Taulukosta 6.10 huomataan, että puuosat nostavat luukkujen jalustojen U-arvoa noin 30...35 % poikkeuksena Passiivikuvun jalusta, jossa puuosien vaikutus on noin 71 %, mikä selittyy tehokkaamman lämmöneristeen käytöllä, kuten jo aiemmin todettiin. Kansien osalta puiset tukirakenteet poistettiin umpinaisesta Orivent 21-luukusta ja tuloksista huomataan, että puuosien vaikutus on noin 50 %.

Kuten metallirakenteisten luukkujen kohdalla myös puurakenteisissa luukuissa voidaan tutkia tolppien sekä ylä- ja alaohjauspuiden vaikutusta. Taulukossa 6.11 on esitetty laskentatapaukset, joissa luukuissa ei ole runkotolppia, vaan pelkästään ala- ja yläohjauspuu.

**Taulukko 6.11.** Taulukossa esitetty U-arvoja rakennemalleista, joista on poistettu rakenteissa olevat puiset tolpat, jotka ulottuvat sisäpuolelta ulkopuolelle. Lisäksi kyseisiä U-arvoja on verrattu rakenteiden virallisiin U-arvoihin.

	Ideaalisen kannen U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Ideaalisen jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Muutos kannen U-arvossa [%]	Muutos jalustan U-arvossa [%]
Orivent 01	-	0,50	-	12,88
Orivent 21	0,83	0,51	4,46	12,56
Orivent 41	-	0,49	-	12,34
Passiivikupu	-	0,39	-	6,20

Taulukosta 6.11 huomataan, että puiset tolpat nostavat jalustan U-arvoa noin 12 % luukuun ottamatta Passiivikupua, jossa vaikutus oli noin puolet. Orivent 21-kannen kohdalla keskellä olevien puisten tukipuiden vaikutus kannen U-arvoon on noin 4 %.

Taulukossa 6.12 on esitetty vastaavasti laskentatuloksen malleista, joissa ei ole ala- ja yläohjauspuita eikä reunapuita kannessa, vaan ainoastaan rakenteiden keskellä kulkevat tolpat.

**Taulukko 6.12.** Taulukossa esitetty U-arvoja rakennemalleista, joista on poistettu rakenteiden reunoilla kulkevat puiset ohjauspuut, jotka ulottuvat sisäpuolelta ulkopuolelle. Lisäksi kyseisiä U-arvoja on verrattu rakenteiden virallisiin U-arvoihin.

	Ideaalisen kannen U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Ideaalisen jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Muutos kannen U-arvossa [%]	Muutos jalustan U-arvossa [%]
Orivent 01	-	0,48	-	17,01
Orivent 21	0,60	0,49	44,00	15,28
Orivent 41	-	0,50	-	10,38
Passiivikupu	-	0,27	-	51,93

Taulukosta 6.12 huomataan, että erot todelliseen malliin verrattuna ovat suurempia kuin taulukossa 6.11 olevat arvot. Tämä tarkoittaa sitä että suurempi osa johtumislämpöhäviöistä tapahtuu ylä- ja alaohjauspuiden kautta kuin pystytolppien kautta. Erityisesti tämä ilmiö tulee esille Orivent 21:n kannessa ja Passiivikuvun jalustassa.

### 6.3 Laskentatavan vaikutus U-arvoihin

Edellä esitetyt tulokset on tarkasteltu kolmiulotteisilla rakennemalleilla, jotka on mallinnettu Comsoliin. Laskentatavasta johtuen tulosten välille voi syntyä eroja. Esimerkiksi elementtiverkon tiheys ja mallin osiin jakaminen vaikuttavat tuloksiin. Puurakenteisten luokkujen osalta laskenta oltaisi voitu suorittaa myös standardin EN-6949 mukaan, mikä saattaisi antaa erilaisia tuloksia myös. Tässä luvussa on tarkasteltu edellä mainittujen asioiden vaikutusta tuloksiin.

#### 6.3.1 Elementtiverkon vaikutus tuloksiin

Laskentamalleissa elementtiverkon tiheydeksi valittiin tihein mahdollinen verkko, mikä johti tarkimpaan mahdolliseen tulokseen. Rajoitukset elementtiverkon tiheydelle asetti tietokoneen suorituskyky, joka loppui elementtiverkon ollessa liian tiheä. Comsolin muodostamaan elementtiverkon tiheyteen puolestaan vaikutti mallien geometria ja erityisesti yksityiskohdat. Jos mallissa on paljon pieniä yksityiskohtia, tulee verkosta tiheä automaattisesti niissä kohdissa, jolloin verkotuskapasiteetti vähenee toisissa kohdissa. Taulukkoon 6.13 on koottu rakenneosien U-arvoja tiheimmällä verkolla ja harvimmalla verkolla.

**Taulukko 6.13.** Taulukkoon on koottu rakenteenosien U-arvoja laskettuna hienoimmalla mahdollisella elementtiverkolla ja karkeimmalla mahdollisella elementtiverkolla. Lisäksi laskennassa saatuja arvoja on verrattu keskenään.

	Jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]			Kannen U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]		
	Tarkin mahdollinen	Epätarkin mahdollinen	Muutos [%]	Tarkin mahdollinen	Epätarkin mahdollinen	Muutos [%]
Orivent 01	0,56	0,56	0,30	1,67	1,69	1,14
Orivent 21	0,57	0,57	0,36	0,87	0,87	0,00
Orivent 23	1,29	1,31	2,07	1,82	1,86	1,81
Orivent 31	1,37	1,38	0,49	1,82	1,86	1,81
Orivent 41	0,55	0,55	0,57	1,60	1,60	-0,01
Orivent 51L	0,77	0,79	1,78	1,60	1,72	7,49
Orivent 52	1,44	1,46	1,24	2,00	2,03	1,54
Passiivikupu	0,41	0,41	0,42	1,10	1,11	1,31
ka	0,87	0,88		1,56	1,59	

Taulukosta 6.13 havaitaan, että erot elementtiverkkojen välillä on suhteellisen pieniä. Kaikissa rakenteissa tiheämpi verkko antoi pienemmän U-arvon kuin harvempi verkko, paitsi Orivent 41:ssä, missä tihein mahdollinen verkko antoi hieman suuremman U-arvon kuin harvin mahdollinen verkko. Ero ei ollut kuitenkaan kuin 0,01 %. Suurimmat erot tulosten välillä löytyy pääsääntöisesti metallisista luukuista. Tämä johtuu metallin suuresta lämmönjohtavuudesta, mikä puolestaan vaikuttaa voimakkaasti lämpövirtojen tiheyksiin. Toisin sanoen laskentatarkkuudella on enemmän vaikutusta alueille, joissa lämpövirran tiheys on suuri kuin alueilla, joissa lämpövirran tiheys on pieni. Kaikista suurin ero eri verkkojen välillä on Orivent 51L kansiosassa, joka oli geometrialtaan kaikista haastavin.

Taulukossa 6.14 on esitetty kokonaisten luukkujen mallien U-arvot tiheimmällä ja harvimmalla mahdollisella elementtiverkolla.

**Taulukko 6.14.** Kokonaisten luukkujen U-arvot laskettuna hienoimmalla ja karkeimmalla elementtiverkolla.

	Koko luukun U-arvo tarkimmalla mahdollisella verkolla [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Koko luukun U-arvo epätarkimmalla mahdollisella verkolla [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Muutos [%]
Orivent 01	0,81	0,81	0,00
Orivent 21	0,50	0,51	2,00
Orivent 23	0,92	0,95	3,26
Orivent 31	1,27	1,29	1,57
Orivent 41	0,85	0,85	0,00
Orivent 51	1,22	1,23	0,82
Orivent 51L	1,26	1,30	3,17
Orivent 52	1,63	1,64	0,61
Passiivikupu	0,58	0,59	1,72

Taulukosta 6.14 huomataan, että muutos rakenteiden U-arvoissa ei ole kovinkaan suuri. Suurin muutos kokonaisten mallien osalta on Oriven 51L-luukussa aivan kuten tarkasteltaessa elementtiverkon vaikutusta rakenteen osiin taulukossa 6.13.

### 6.3.2 Rakenteiden jako tarkasteltaviin osiin

Kuten luvussa 3.1 todettiin, luukkujen U-arvot voidaan laskea jakamalla luukku kolmeen osaan (jalusta, reunaprofiili ja kansi) tai kahteen osaan (jalusta ja kansi), jossa jalustan U-arvoon on laskettu mahdollisen reunaprofiilin vaikutus. Comsolilla lasketuissa U-arvoissa rakenteet on käytännössä jaettu kansiosaan ja jalustaan ja viralliset luukkujen U-arvot on laskettu kokonaisen luukun laskentamallista. Kirjoittajan näkemyksen mukaan Orivent 41, Orivent 01 ja Passiivikupu ovat ainoat luukut, joissa rakenne oltaisiin voitu jakaa perustellusti myös kolmeen osaan. Viivamainen lisäkonduktanssi kannen ja profiilin välillä voidaan laskea kun tiedetään kannen ja jalustan U-arvo sekä koko luukun U-arvo, jotka on jo aikaisemmin laskettu. Taulukkoon 6.15 on koottu kyseisten luukkujen U-arvot, kun rakenne on jaoteltuna jalustaan, reunaprofiiliin ja kansiosaan.

**Taulukko 6.15.** Taulukossa esitetty Orivent 41 ja Passiivikuvun U-arvot, kun rakenteen jaettu kolmeen tarkasteltavaan osaan (jalusta, kansi ja reunaprofiili). Lisäksi saatuja tuloksia on verrattu virallisiin U-arvoihin.

	Jalustan U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Kannen U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Profiilin U-arvo [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Viivamainen lisäkonduk- tanssi kannen ja jalustan välillä [W/(m*K)]	Viivamainen lisäkonduk- tanssi kannen ja profiilin välillä [W/(m*K)]	Koko luu- kun U- arvo	Muutos toiselle mallilla lasket- tuun U- arvoon [%]
Orivent 41	0,55	1,70	1,40	0,01	-0,15	0,80	6,25
Passiivikupu	0,41	1,02	1,29	0,00	-0,11	0,64	10,35
Orivent 01	0,56	2,00	1,70	0,08	-0,22	0,92	13,58

Taulukosta 6.15 huomataan, että jaoteltuna rakenne kolmeen osaan U-arvoista saadaan suuremmat mitä jaottelulla kahteen osaan. Erot ovat noin 10 % ollen pienin Orivent 41:ssä ja suurin Orivent 01:ssä. Orivent 01 laskentamalli oli todella pelkistetty, mikä on todennäköisesti suurin selittävä tekijä suurimmalle erolle mallien välillä.

### 6.3.3 Puisten jalustojen U-arvot laskettuna EN ISO 6946 mukaan

Luukut, joissa käytetään puuta rakenteissa voidaan laskea myös käsin yllä mainitun standardin avulla. Käsinlaskettaessa rakenteessa olevia yksityiskohtia ei voida kuitenkaan ottaa huomioon yhtä tarkasti kuin numeerisella laskentaohjelmalla kuten Comsolilla. Taulukossa 6.16 on esitetty Orivent 01, 21, 41 ja Passiivikuvun jalustojen U-arvot käsinlaskettuna.

**Taulukko 6.16.** Taulukossa on esitetty Orivent 01, 21 ja Passiivikuvun jalustojen U-arvot laskettuna EN-6946 mukaan ja verrattu saatuja tuloksia virallisiin U-arvoihin.

	Jalustan U-arvo laskettuna EN-6946 mukaan (1D) [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Muutos verrattuna Comsolilla laskettuun U-arvoon (3D) [%]
Orivent 01	0,68	21,61
Orivent 21	0,70	22,40
Orivent 41	0,70	26,37
Passiivikupu	0,49	19,48

Tuloksista huomataan, että käsinlasketut U-arvot ovat keskimäärin reilut 20 % suurempia kuin Comsolilla numeerisesti laskettuna. Erot selittyvät pitkälti yksityiskohtien yk-

sinkertaistamisella ja sillä, että Comsolissa rakenne mallinnettiin kolmiulotteisena, jolloin rakenteiden pystynurkat toimivat negatiivisina kylmäsiltoina, määritettäessä U-arvo ulkopintojen mukaan, pudottaen U-arvoa.

## 7 TULOSTEN EPÄVARMUUSTEKIJÖITÄ

Kappaleessa 6 esitettiin laskenta tuloksia ja analysoitiin U-arvoihin vaikuttavia tekijöitä ja niiden suuruutta. Tämä kappale on yhteenveto tuloksiin vaikuttavien tekijöiden epävarmuustekijöistä.

Savunpoistoluukkujen ja kattovalokupujen SolidWorks- mallit oli laadittu lähinnä palvelemaan tuotannollisia tarpeita eivätkä soveltuneet sellaisinaan numeeriseen laskentaan. Tämän johdosta malleja jouduttiin yksinkertaistamaan ja pelkistämään, mistä luonnollisesti aiheutuu eroa todellisen ja laskennallisen tilanteen välillä. Nämä toimenpiteet koskivat kuitenkin yksittäisiä detaljeja, kuten kappaleessa 5.4.2 esitettiin. Näiden pelkistysten vaikutusta U-arvoihin ei ole tutkittu tarkemmin, mutta niiden vaikutus on mitä todennäköisimmin pieni. Malleissa liitokset on oletettu ideaalisiksi, mikä tarkoittaa sitä, että osat liittyvät toisiinsa koko pituutensa matkalta. Käytännön rakenteissa voi kuitenkin olla vinouksia ja kiertymiä, joiden johdosta kontakti ei välttämättä ole ideaalinen, millä on puolestaan teoriassa vaikutus myös U-arvoihin.

Materiaaliarvojen valinnalla on vaikutus tuloksiin. Kappaleessa 5.4.3 on esitetty laskennassa käytetyt materiaaliarvot. Jokaisella materiaaliarvolla on kuitenkin vaihteluväli, eivätkä ne siis ole yksiselitteisiä. Esimerkkinä teräs, jonka lämmönjohtavuudeksi ilmoitetaan lähteestä riippuen  $20 \dots 100 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$ . Lämmönjohtavuuteen vaikuttivat lisäaineet ja seossuhteet. Laskelmissa käytetty  $50 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$  on kuitenkin standardeista löytyvä arvo, ja näin ollen luotettava valinta metalliosien lämmönjohtavuudeksi. Lisäksi lämmönjohtavuus, kuten myös muutkin materiaaliominaisuudet, vaihtelevat ympäristön olosuhteiden mukaan, millä on vaikutusta rakenteen lämpötekniseen toimintaan käytännöolosuhteissa.

Kuten luvussa 6.3.1 todettiin, elementtiverkon tiheydellä on vaikutus numeerisesti ratkaisemalla saatuun U-arvoon. Yksittäisessä rakenteessa tai rakenteenosassa vaikutus ei ole kovinkaan merkittävä, mutta mikäli mallia pilkotaan ja rakenteen osia lasketaan erikseen, voi numeerisen epätarkkuuden vaikutus kertautua.



## 8 YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSTARPEET

Laskennassa saatiin määritettyä eri luokkutyypeille todentuntuiset U-arvotasot. Tulok-  
sista huomattiin, että metallisilla osilla, jotka ulottuvat luukun sisäpuolelta luukun ulko-  
puolelle, on suuri vaikutus rakenteen U-arvoon. Myös puisilla osilla oli vaikutusta, mut-  
ta huomattavasti vähemmän kuin metallisilla osilla. Käytettäessä U-arvon laskennassa  
rakenteen sisämittoja U-arvojen havaittiin olevan noin 30 % suurempia kuin käytettäes-  
sä rakenteen ulkomittoja. Luukkujen johtumislämpöhäviöitä tarkasteltaessa huomattiin,  
että rakenteiden reunojen peltiosien ja puuosien kautta johtuu hieman enemmän lämpöä  
kuin rakenteiden keskellä olevien tukirakenteiden kautta. Metalliosat nostivat tutkittujen  
luukkujen U-arvoja keskimäärin noin 200 % ja puuosat keskimäärin noin 30 %

Yksittäisten luukkujen osalta havaittiin, että Orivent 52:ssa oli kaikista suurin U-arvo,  
mikä selittyy kaksilehtisellä kansirakenteella ja metallilla päällystetyllä tukipalkilla ra-  
kenteen keskellä. Orivent 31-jalustan yläreunassa kulkeva U-profiilin havaittiin myös  
nostavan paljon kyseisen luukun U-arvoa. Passiivikuvussa puiset osat lisäsivät johtu-  
mislämpöhäviöitä enemmän kuin muissa puurakenteisissa luukuissa.

Jatkotutkimuksia varten luukkujen rakenteet ja erityisesti liitosten detaljit tulisi selkeyt-  
tää. Varsinkin metalliosien kohdalla näennäisesti pienillä eroilla voi olla laskennallisesti  
suuri merkitys U-arvoissa. Lisäksi luukkujen U-arvot olisi hyvä määrittää kokeellisesti  
testaamalla, jotta saataisiin vertailukelpoisia tuloksia laskennallisten analyysien tueksi.  
Energialaskentaa ajatellen tulisi selvittää jalustarakenteiden ja erilaisten kattorakentei-  
den liitosten aiheuttamien viivamaisten lisäkonduktanssien lukuarvoja.

Luukkujen U-arvoihin liittyviä standardeja tulisi kehittää yhtenäisimmiksi. Tällä hetkel-  
lä standardissa EN 1873 ei ole esimerkiksi otettu selvästi kantaa pystysuoriin viivamai-  
siin lisäkonduktansseihin, joita esiintyy jalustojen nurkissa. Esimerkiksi metalliraken-  
teisten jalustojen kohdalla ei voida käyttää standardia EN 6946 vaan laskenta pitää suo-  
rittaa numeerisesti mukaillen standardia EN 10211, joka käskee ottamaan huomioon  
rakenteen kaikki kylmäsillat. Standardi EN 6946 ei puolestaan ota selväkäsitteistä kan-  
taa rakenteissa oleviin epäsäännöllisiin kylmäsiltoihin. Tämän johdosta kyseisten kyl-  
mäsiltojen vaikutuksen huomioonottaminen jää avonaiseksi. Tässä työssä esitetyissä  
numeerisissa laskentatuloksissa on otettu huomioon pystysuorat kylmäsillat sekä puura-  
kenteisissa, että metallirakenteisissa luukuissa.

## LÄHTEET

- [1] Tuomaala, P. 2008. [Internet] [viitattu 1.6.2012] Saatavissa: <http://www.julkisivuyhdistys.fi/julkkari2/images/stories/File/energiaseminaari08/Tuomaala.pdf>
- [2] Lehtinen T. Tekes seminaari. 22.5.2012, Helsinki, Paasitorni. Kalvot saatavissa: <http://www.slideshare.net/Tekesslide/225-teppo-lehtinen>
- [3] COMSOL AB [Internet] [viitattu 19.6.2012] Saatavissa: <http://www.comsol.com/company/>
- [4] Lähteenmäki, M. Yleinen elementtimenetelmä. TAMK. [Internet] [viitattu 6.8.2012] Saatavissa: [http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/elja\\_pdf/yhtalot.pdf](http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/elja_pdf/yhtalot.pdf)
- [5] Heinonen, V. Savunpoistolaitteiden toimintavarmuus. Opinnäytetyö. Leppävaara 2009. Laurea-ammattikorkeakoulu. 111 s. [Internet] [viitattu 17.12.2012] Saatavissa: <http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2620/opinn%C3%83%C2%A4ytety%C3%83%C2%B6.veera.heinonen.pdf?sequence=1>
- [6] Keraplast. Orivent savunpoistoluukut ja -ikkunat (painovoimainen savunpoisto). RT 38223. [Internet] [viitattu 17.12.2012] Saatavissa: <http://www.keraplast.fi/media/rtkortit/38223.pdf>
- [7] Pohjois-savon pelastuslaitos. Savunpoistosuunnitelma [Internet] [viitattu 2.1.2012] Saatavissa: <http://www.kuopio.fi/documents/556622/557163/sps-ohje.pdf>
- [8] SFS-EN 12101-2. Savunhallintajärjestelmät. Osa 2: Savunpoistoluukut = Smoke and heat control systems. Part 2: Specification for natural smoke and heat exhaust ventilators. Helsinki 2003. Suomen standardisoimisliitto, 67 s.
- [9] prEN 1873. Prefabricated accessories for roofing – Individual rooflights of plastics – Product specification and test methods, 72 s.
- [10] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulu-

tuksessa. Tampere 2013. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 159. 300 s. (Toistaiseksi julkaisematon)

- [11] SFS-EN ISO 10211. Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations (ISO 10211:2007), Helsinki 2008, Suomen standardisoimisliitto, 45 s.
- [12] Ympäristöministeriö. 2011. Viivamaisen lisäkonduktanssien laskentaopas. Ohje rakennusosien välisten liitosten viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaan, 107 s. [Internet] [viitattu 2.1.2013] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=135713&lan=sv>
- [13] SFS-EN ISO 6946. Rakenne ja rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentamenetelmä = Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method (ISO 6946:2007) Helsinki 2008. Suomen standardisoimisliitto. 32 s.
- [14] SFS-EN ISO 10456 + AC. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpötekni- sen suunnitteluarvon määrittämiseksi = Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermavalues. Helsinki 2008. Suomen standardisoimisliitto. 30 s.
- [15] RIL 225-2011\_Luonnos\_13.2.2011. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta. 52 s.
- [16] Ympäristöministeriö. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4 (luonnos 9.5.2011). 43 s.
- [17] SFS-EN 673. Glass in Building. Determination of thermal transmittance (U-value). Calculation method. Helsinki 2011, Suomen standardisoimisliitto, 18 s.
- [18] Yoav, P. Chapter 9: Natural Convection, Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering Rensselaer Polytechnic Institute. [Internet] [viitattu 2.1.2013] Saatavissa: [http://www.me.nchu.edu.tw/Enter/html/lab/lab516/Heat%20Transfer/chapter\\_9.pdf](http://www.me.nchu.edu.tw/Enter/html/lab/lab516/Heat%20Transfer/chapter_9.pdf)
- [19] Hens, H. Building Physics – Heat, Air and Moisture Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises. 83 s. [Internet] [viitattu

2.1.2013]

Saatavissa:

<http://books.google.fi/books?id=rYsRnsYtI4gC&pg=PA53&lpg=PA53&dq=prandtl+number+hugo+hens&source=bl&ots=U70rsqhqrI&sig=-9CwOtB5zq7d1SYGAdohVJyg2cw&hl=fi&sa=X&ei=Uz3kUJ2KDYmK4AT-noGwDg&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=prandtl%20number%20hugo%20hens&f=false>

- [20] SFS-EN ISO 100772-2/AC. Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames (ISO 10077-2:2012). Helsinki 2012. Suomen standardisoimisliitto. 36 s.
- [21] Dassault Systemes. [Internet] [viitattu 3.1.2012] Saatavissa: [http://www.solidworks.com/sw/656\\_ENU\\_HTML.htm](http://www.solidworks.com/sw/656_ENU_HTML.htm)
- [22] Myllymäki, V. Solidworks-opetuspaketti. Opinnäytetyö. Ylivieska 2011. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. 28 s. [Internet] [viitattu 3.1.2013] Saatavissa: [http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/30456/Myllymaki\\_Vesa.pdf?sequence=1](http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/30456/Myllymaki_Vesa.pdf?sequence=1)
- [23] Comsol Multiphysics. User's Guide Version 4.3. 2012. 1292 s.
- [24] Luukkarinen, S., Marttila, P. Comsol Multiphysics. Fluid Flow and Chemical Reactions. Intensive Training Course with Comsol Multiphysics. TTL, 19.04.2011. Kurssimateriaali.
- [25] Comsol 4.3. tietokoneohjelma
- [26] Laukkanen, J. Elementtimenetelmäyhtälöiden ratkaisualgoritmien vertailu - Lineaarinen statiikka ja dynamiikka. Tampere 1987. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Konetekniikan osasto. Teknillinen mekaniikka. Raportti 37. 110 s.
- [27] Vinha, J. Rakennusfysiikan luentomoniste. Osa 2.2011. Materiaalitulukot. 469 s.
- [28] Ympäristöministeriö. Suomen rakentamismääräyskokoelma C3. Helsinki 2011. 43 s.

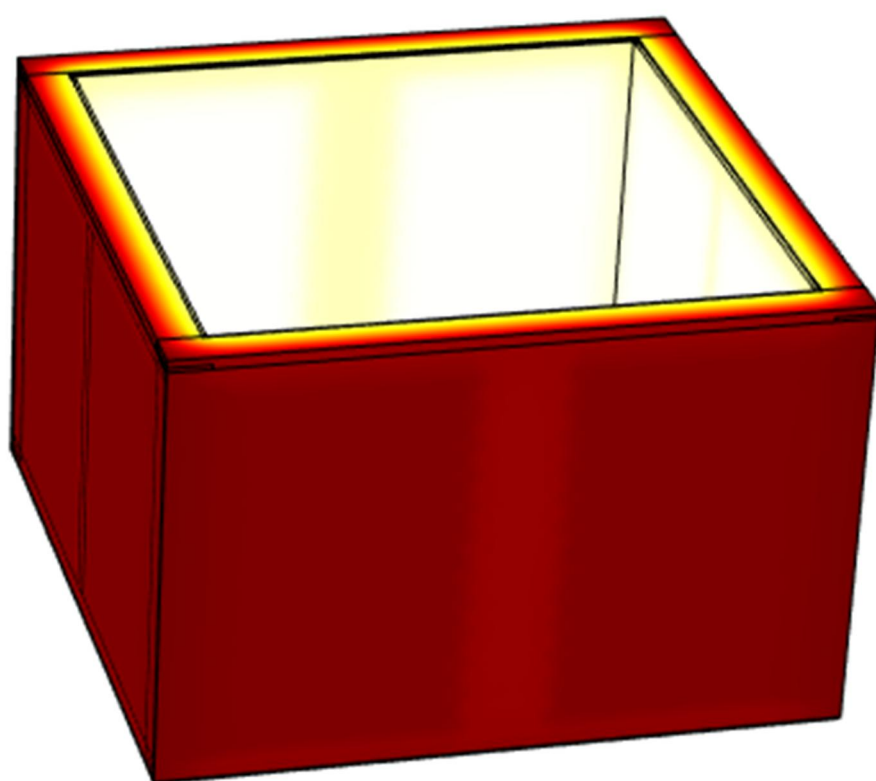
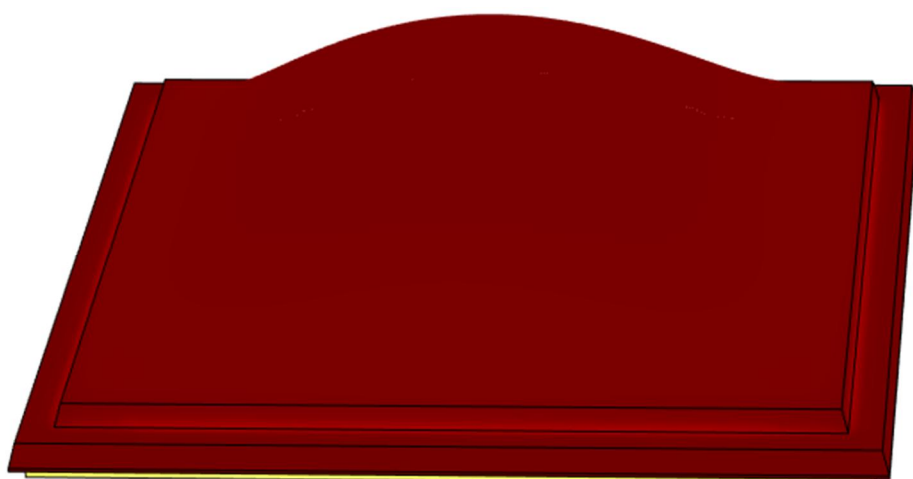
## LIITTEET

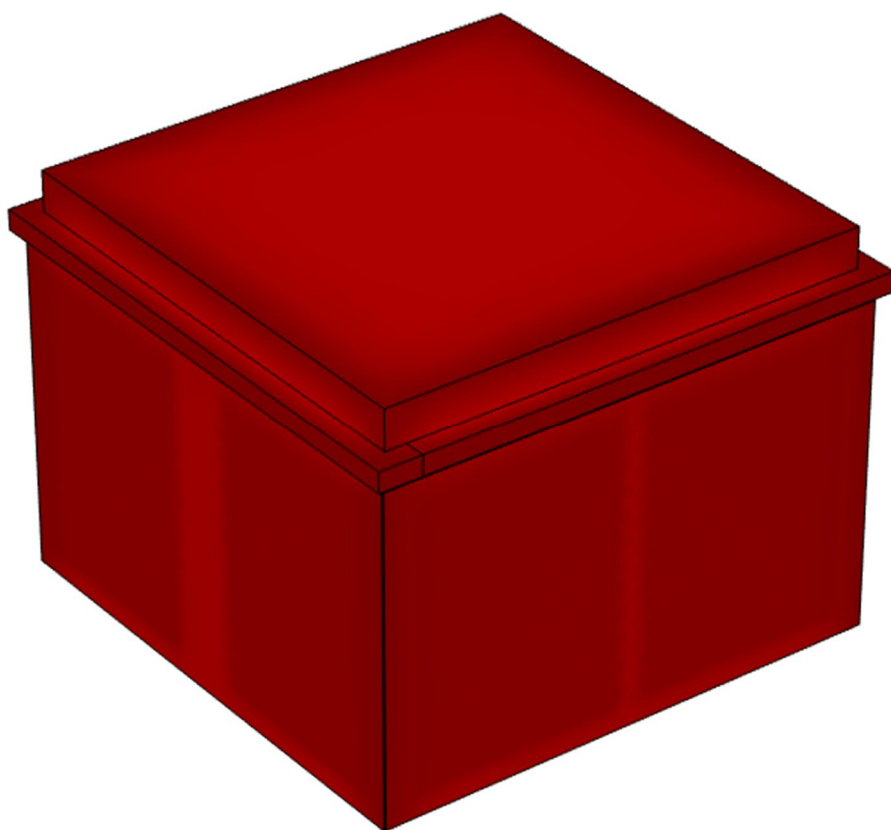
LIITE 1: Tutkittujen rakenteiden lämpökuvat 17 s.

LIITE 2: Orivent 01:n, Orivent 51L:n ja Passiivikuvun läpinäkyvien osien U-arvo laskut 6 s.

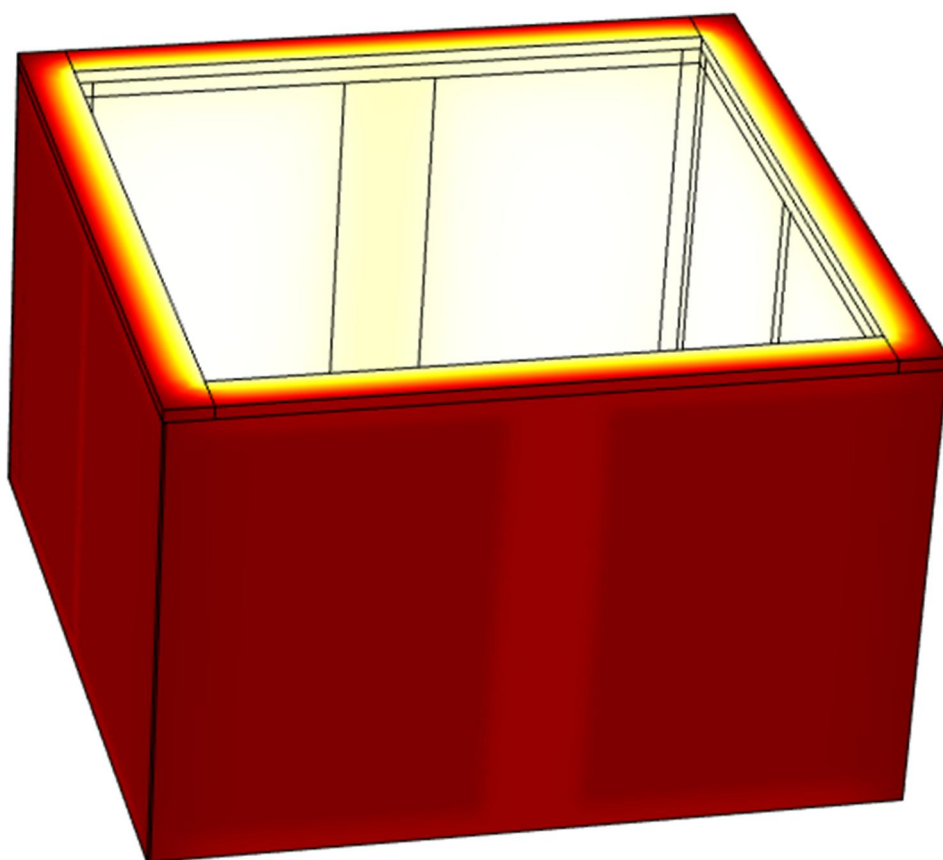
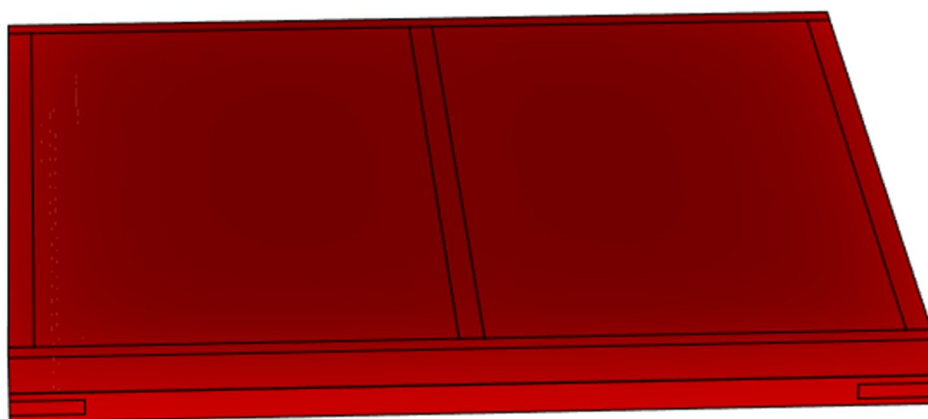
LIITE 3: Puisten jalustojen käsinlasketut U-arvot 12 s.

## Orivent 01

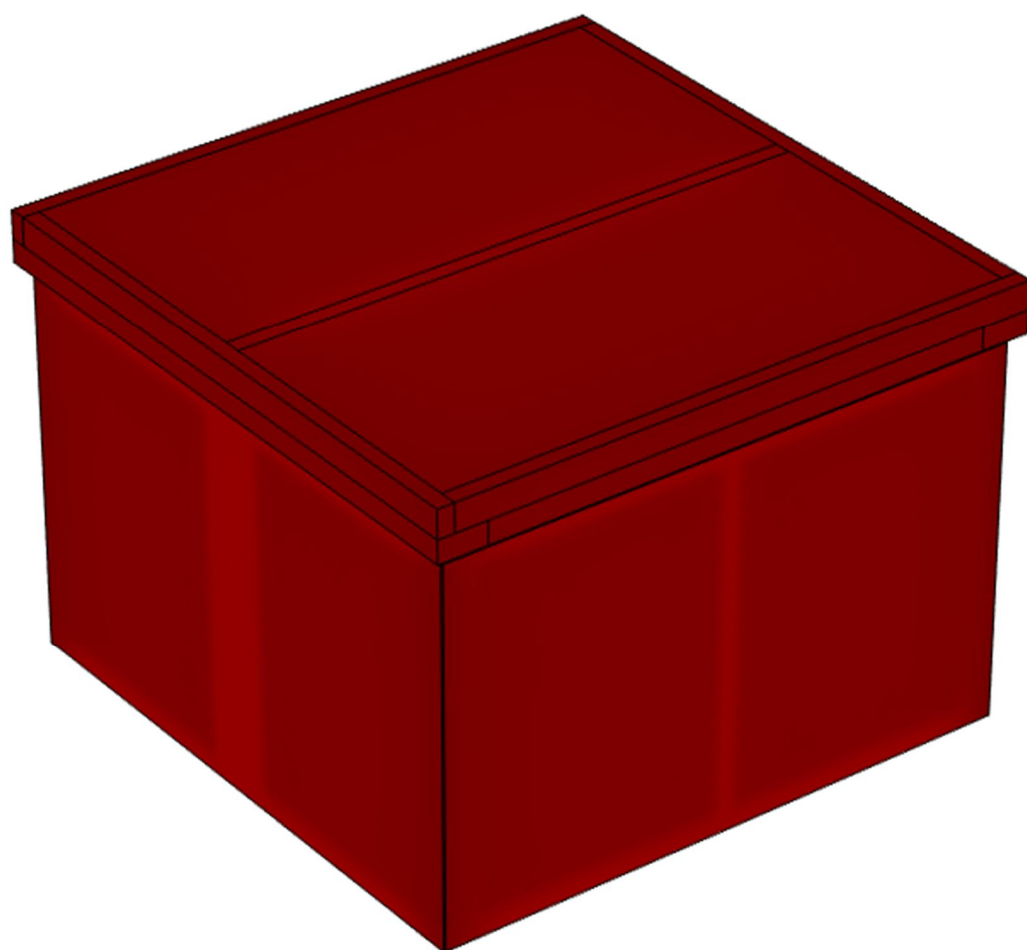




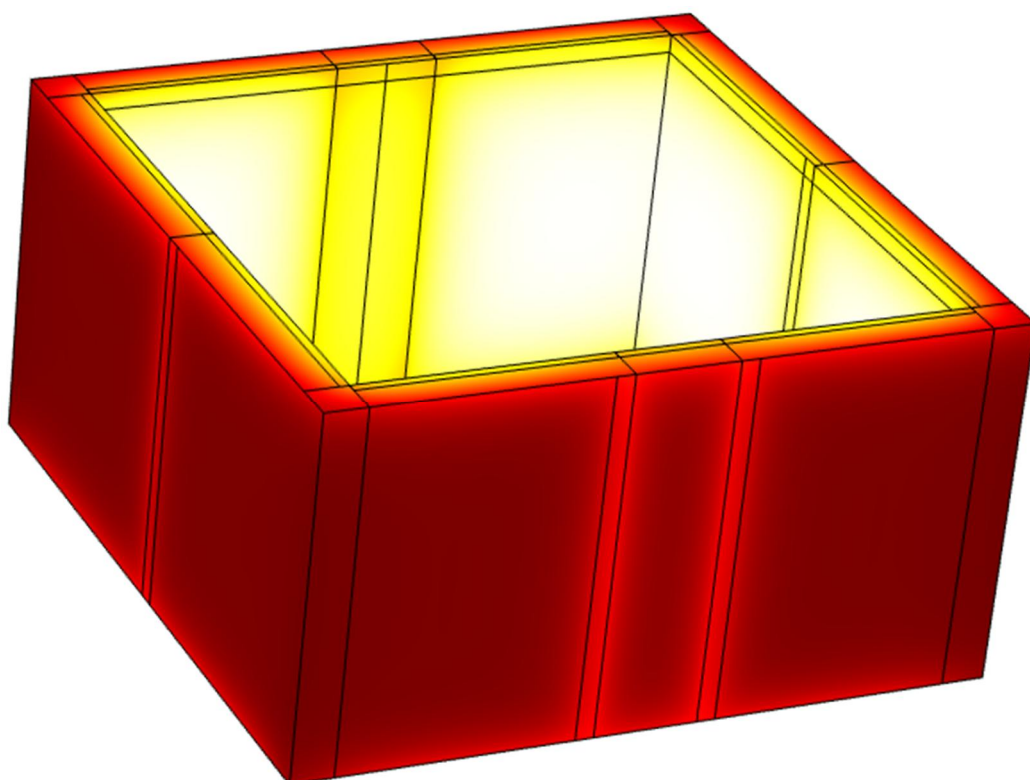
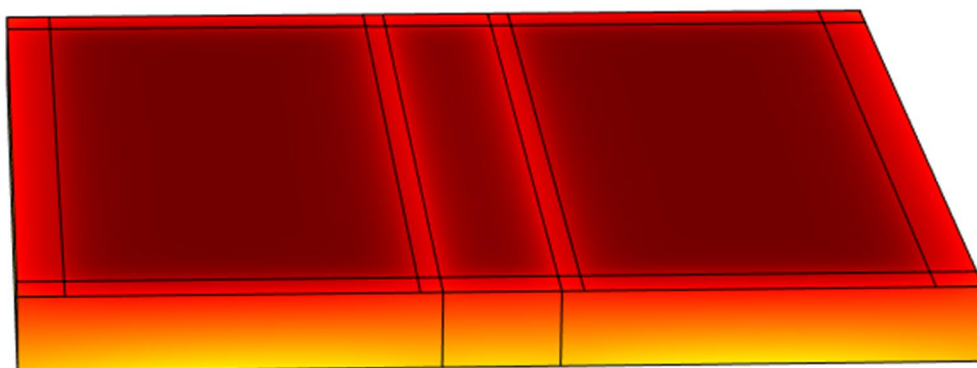
## Orivent 21

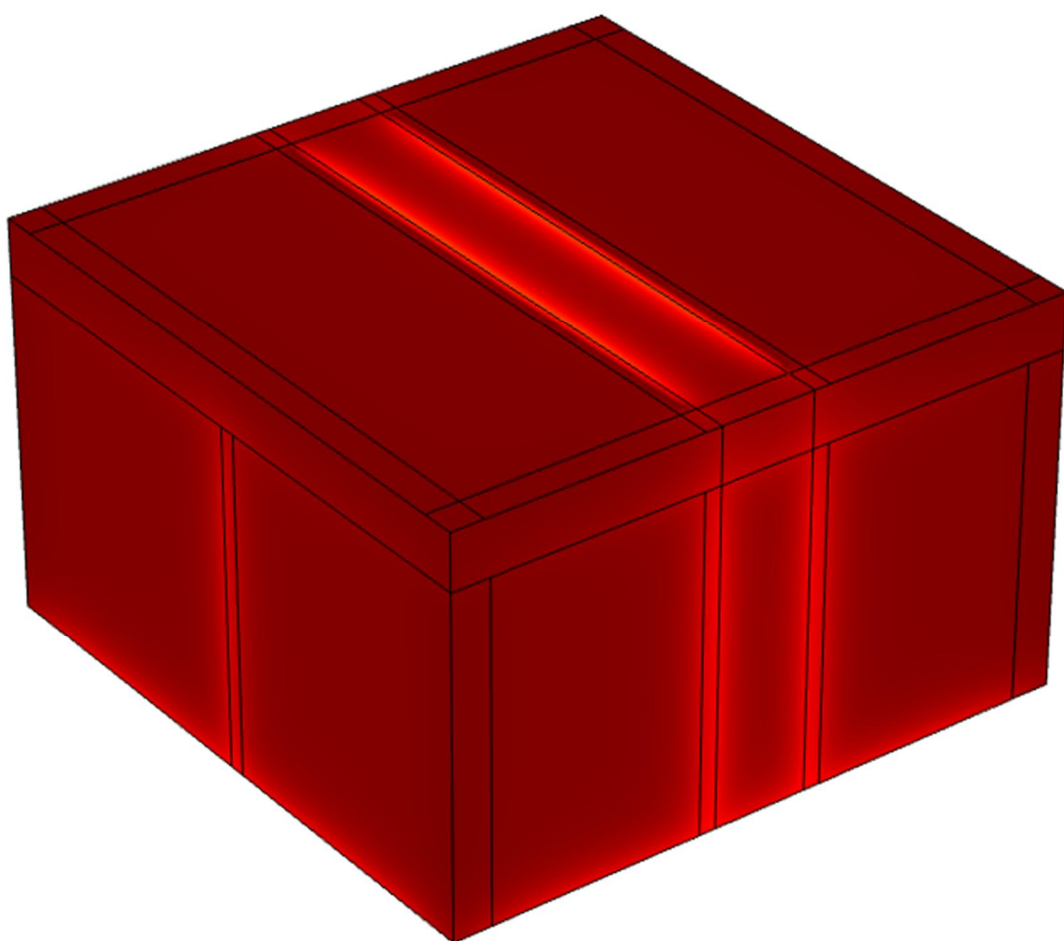




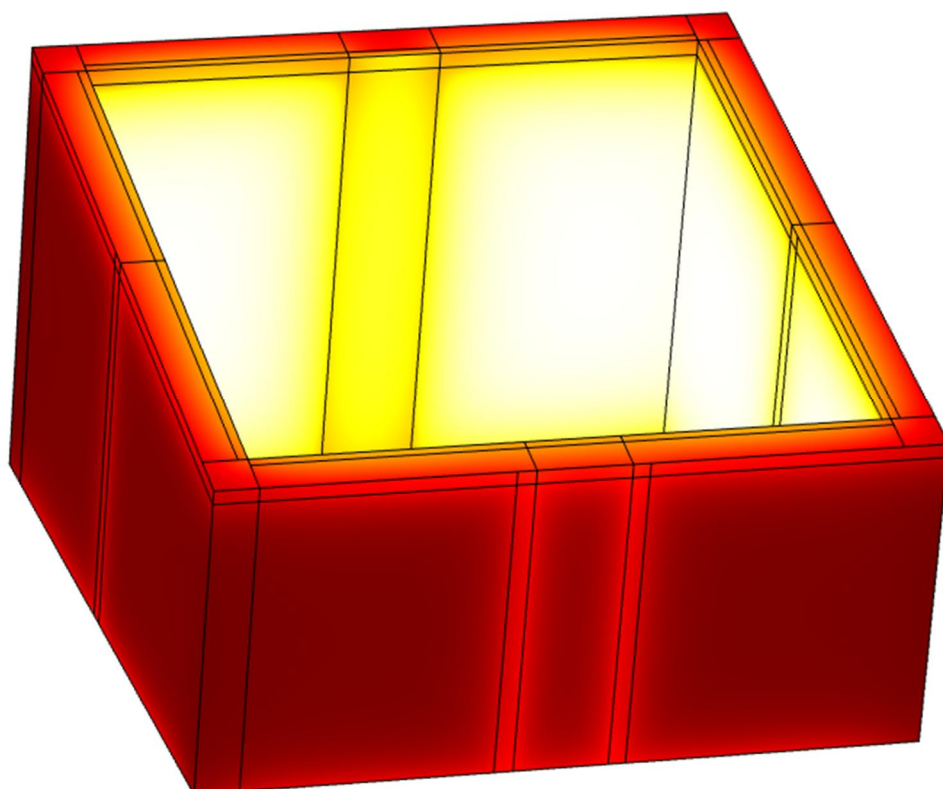
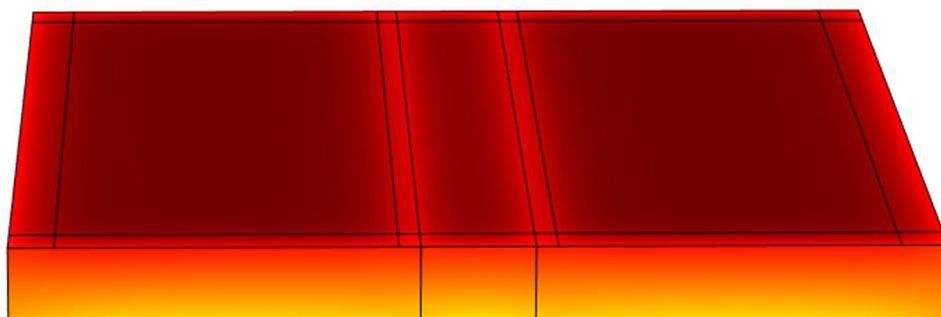


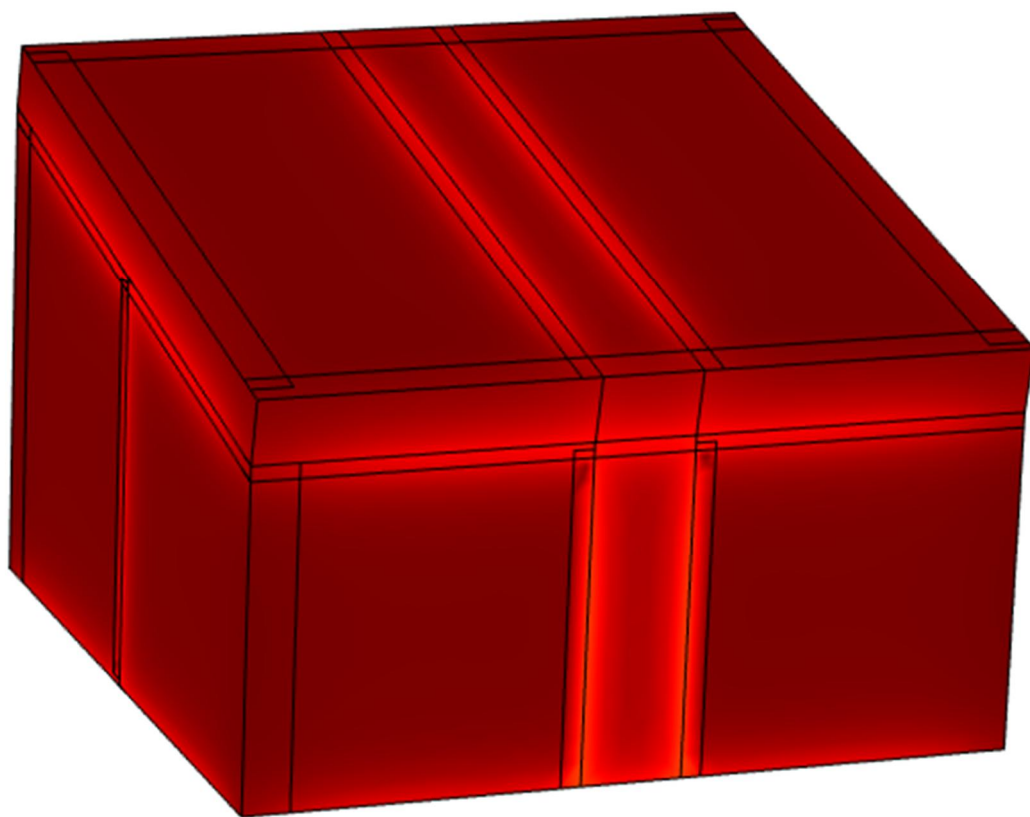
## Orivent 23



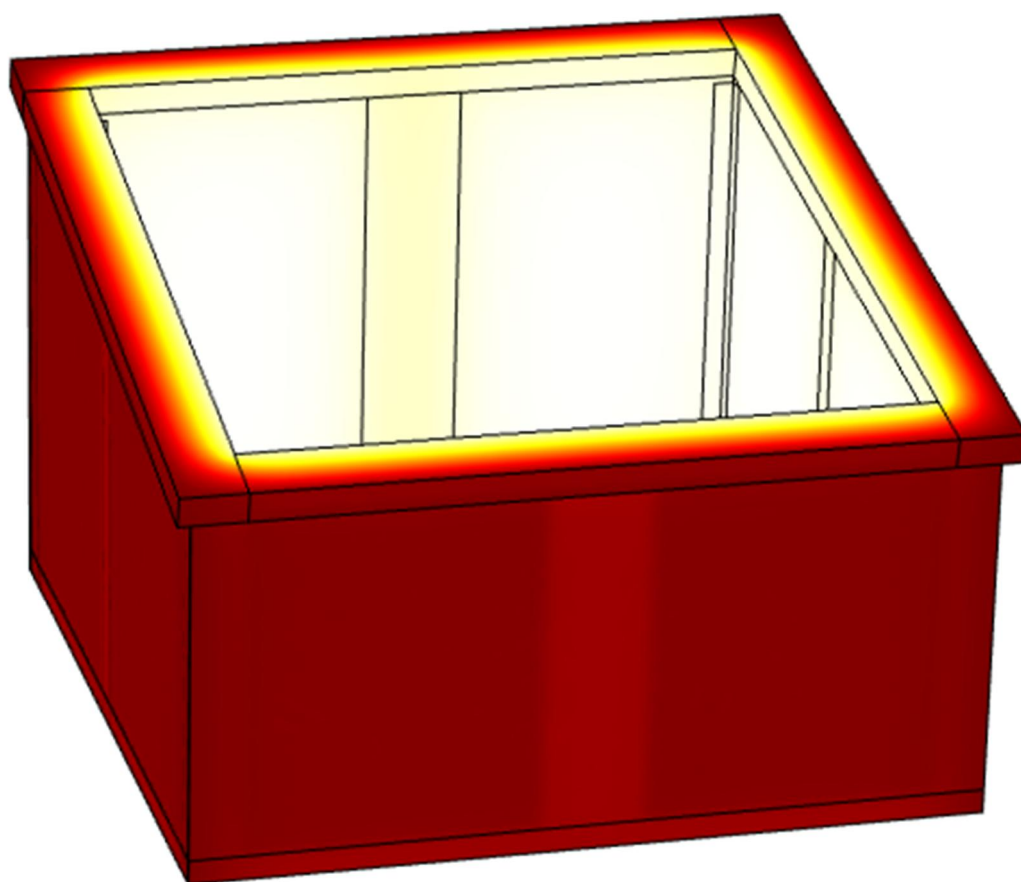


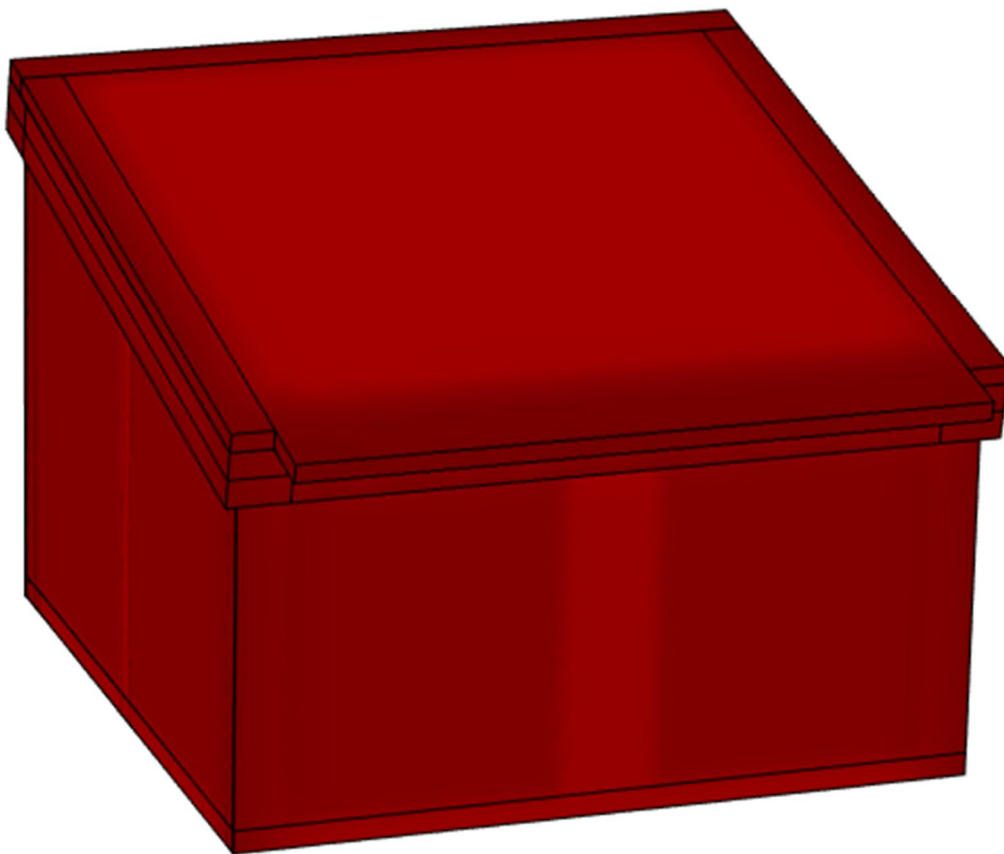
## Orivent 31



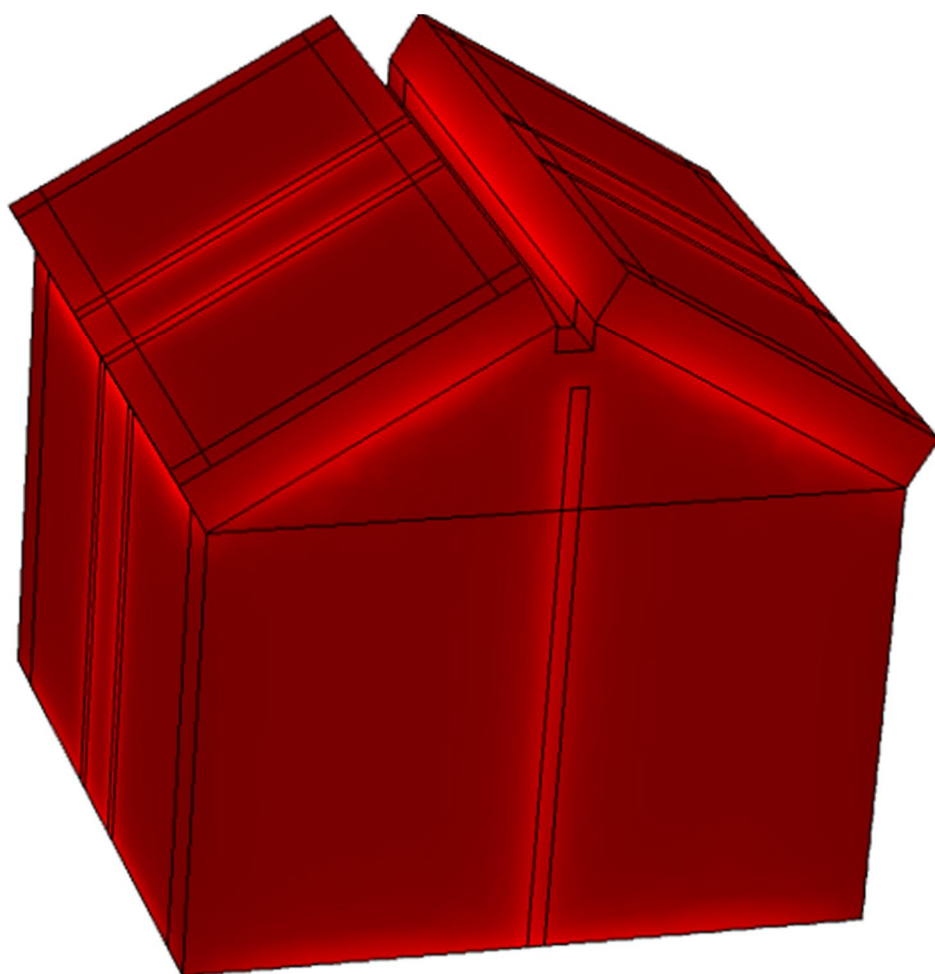


## Orivent 41



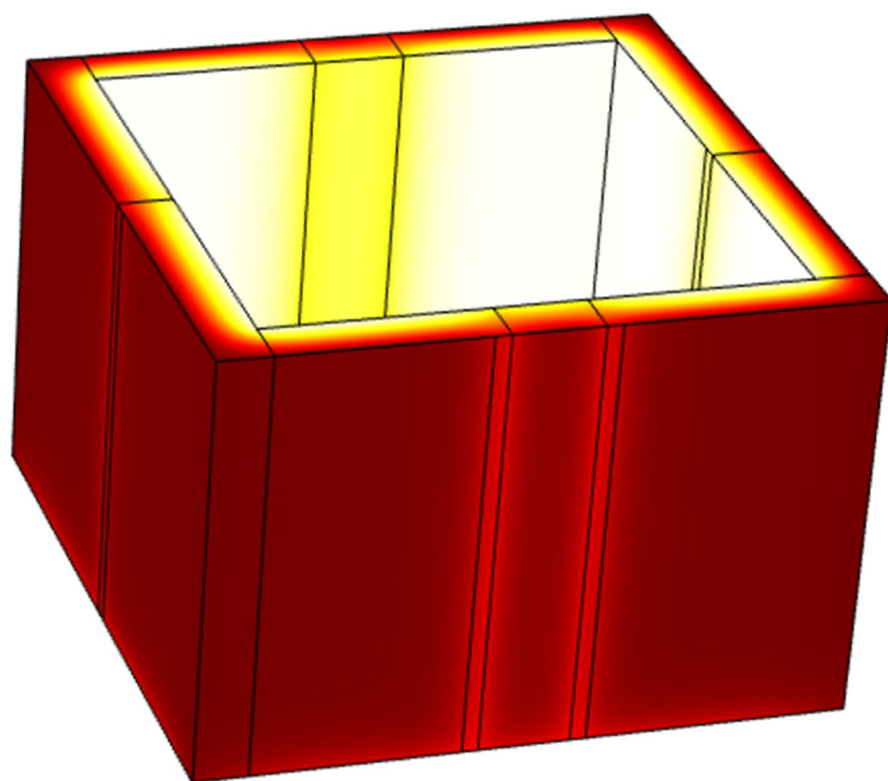
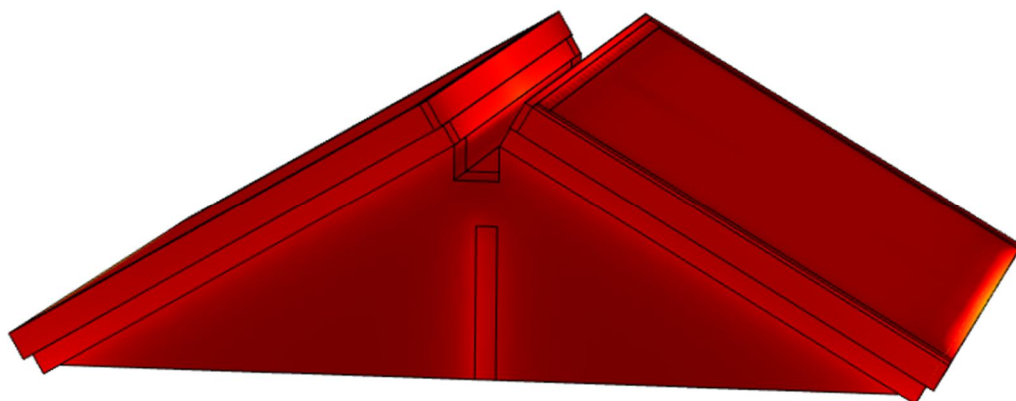


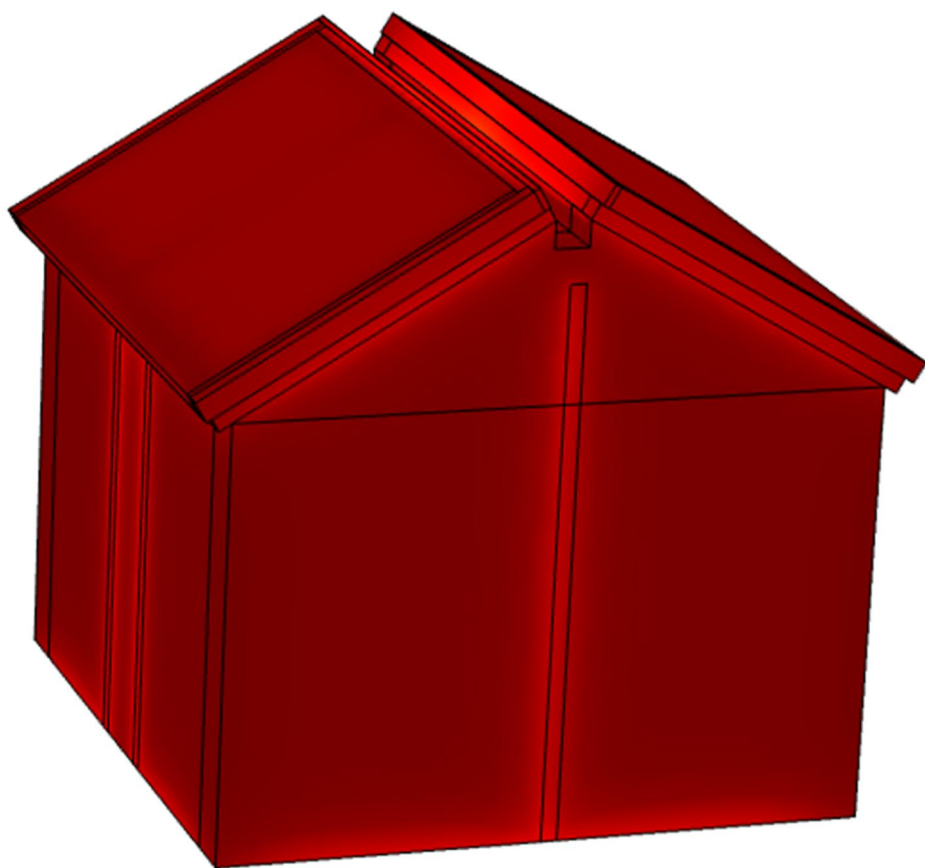
## Orivent 51



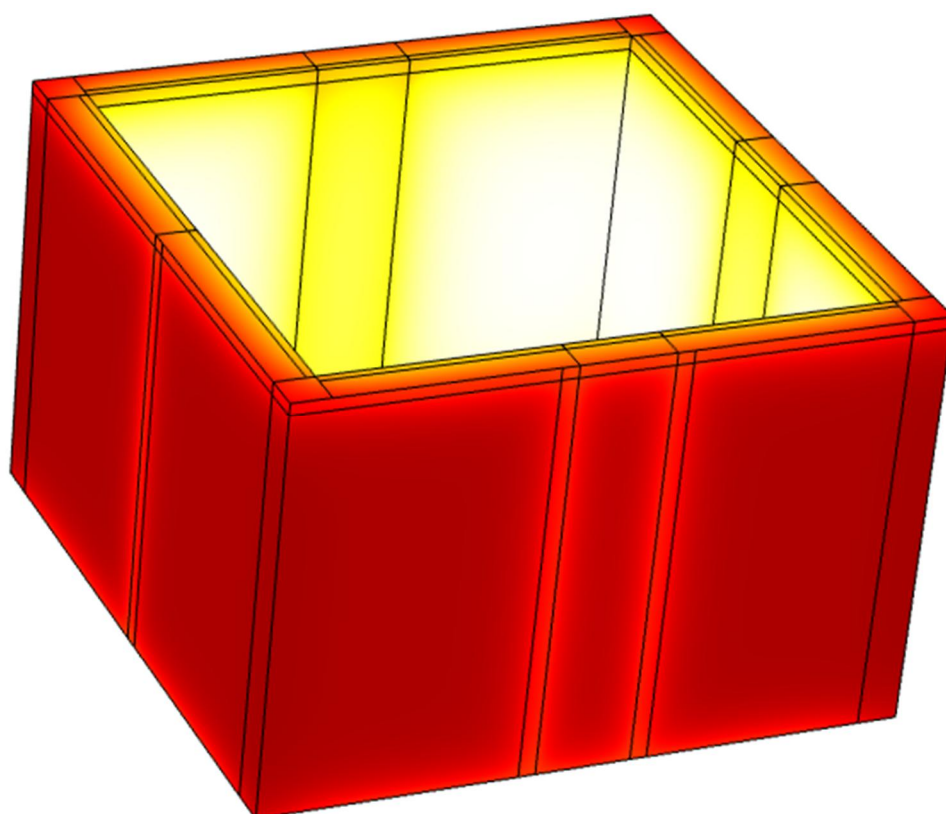
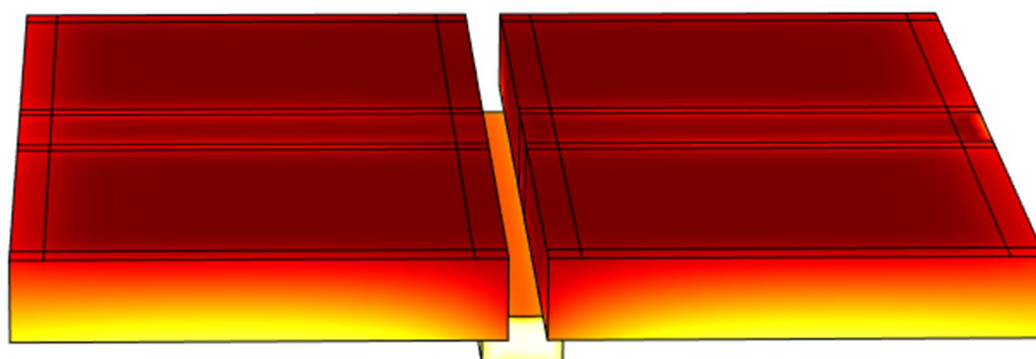


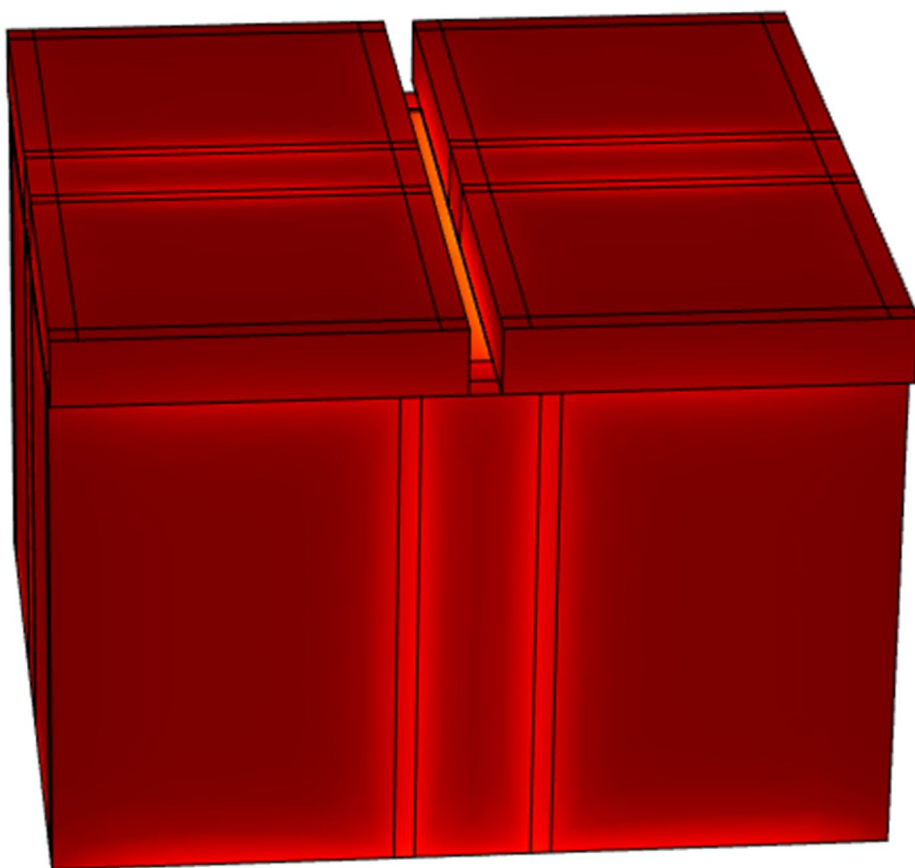
## Orivent 51L



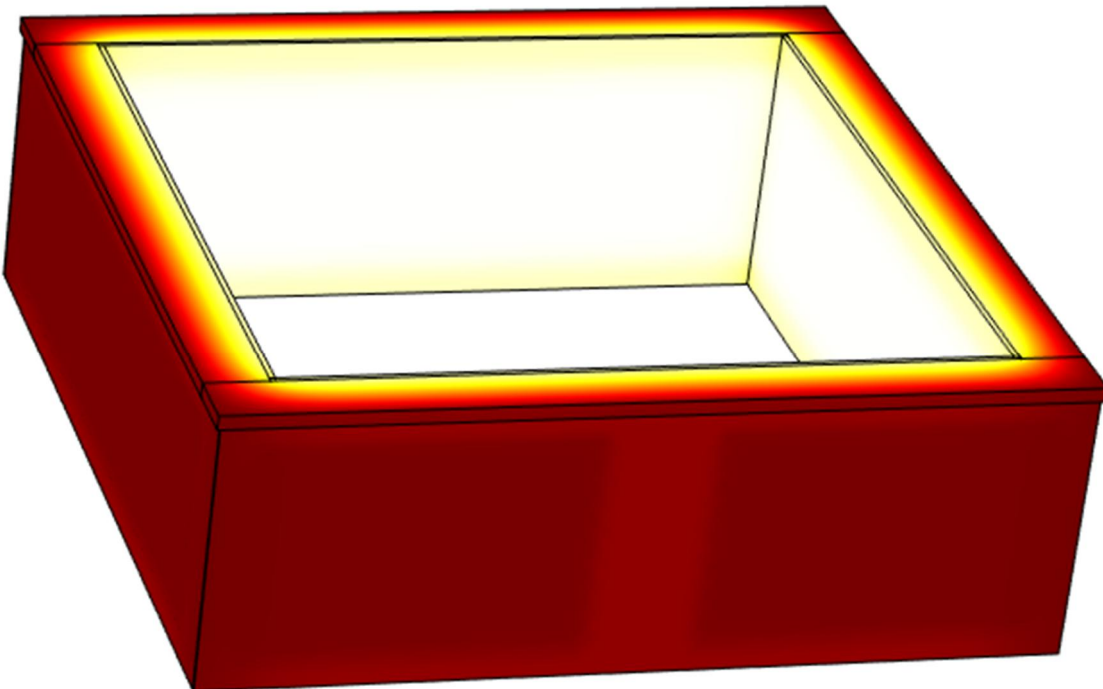


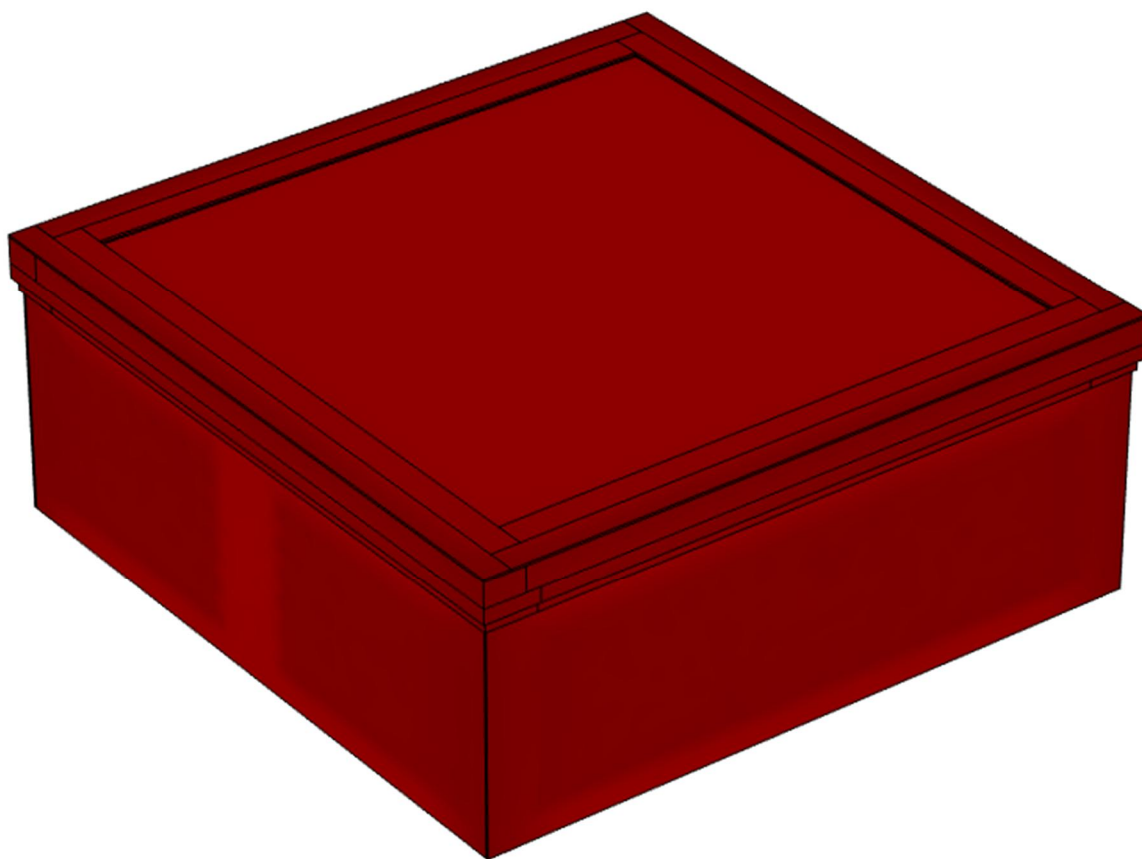
## Orivent 52





# Passiivikupu





# Kuvun U-arvo, Orivent 01

$$r_{\text{akryyli}} := \frac{1}{0.2} \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$A_0 := 0.16$$

$$T_m := 283 \text{K}$$

$$h_e := 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$n := 0.28$$

$$\epsilon_{\text{akryyli}} := 0.84$$

$$h_i := 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\Delta T := 15 \text{K}$$

$$s_{\text{ilmatila}} := 40 \text{mm}$$

Argon

$$\rho_{\text{ilma}} := 1.232 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu_{\text{ilma}} := 1.761 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$\lambda_{\text{ilma}} := 0.02496 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$c_{\text{ilma}} := 1008 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Säteily

$$h_{r,1} := \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{\epsilon_{\text{akryyli}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{akryyli}}} - 1} = 3.722 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

(akryyli - akryyli)

$$h_{r,2} := \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{\epsilon_{\text{akryyli}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{akryyli}}} - 1} = 3.722 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

(akryyli - akryyli)

Johtuminen

$$\text{Gr} := \frac{g \cdot s_{\text{ilmätila}}^3 \cdot \Delta T \cdot \rho_{\text{ilma}}^2}{T_m \cdot \mu_{\text{ilma}}^2} = 1.628 \times 10^5$$

$$\text{Pr} := \frac{\mu_{\text{ilma}} \cdot c_{\text{ilma}}}{\lambda_{\text{ilma}}} = 0.711$$

$$\text{Nu} := A_0 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n = 4.187$$

$$h_g := \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{ilma}}}{s_{\text{ilmätila}}} = 2.613 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

U-arvo

$$h_{s,1} := h_{r,1} + h_g = 6.335 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$h_{s,2} := h_{r,2} + h_g = 6.335 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$h_t := \frac{1}{\frac{1}{h_{s,1}} + \frac{1}{h_{s,2}} + 9\text{mm} \cdot r_{\text{akryyli}}} = 2.772 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$U := \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_e}} = 1.997 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$



## Lasin U-arvo, Orivent 51L

$$r_{\text{lasi}} := 1 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$A_0 := 0.10$$

$$T_m := 283 \text{K}$$

$$h_e := 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$n := 0.31$$

$$\epsilon_{\text{lasi}} := 0.837$$

$$\Delta T := 15 \text{K}$$

$$\epsilon_{\text{selektiivi}} := 0.037$$

$$h_i := 7.7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$s_{\text{ilmatila}} := 15 \text{mm}$$

Argon

$$\rho_{\text{argon}} := 1.699 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu_{\text{argon}} := 2.164 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$\lambda_{\text{argon}} := 0.01684 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$c_{\text{argon}} := 519 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Säteily

$$h_{r,1} := \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{\epsilon_{\text{selektiivi}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{lasi}}} - 1} = 0.189 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

(selektiivipinta - lasipinta)

$$h_{r,2} := \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{\epsilon_{\text{lasi}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{lasi}}} - 1} = 3.7 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

(lasipinta - lasipinta)

Johtuminen

$$\text{Gr} := \frac{g \cdot s_{\text{ilmatala}}^3 \cdot \Delta T \cdot \rho_{\text{argon}}^2}{T_m \cdot \mu_{\text{argon}}^2} = 1.081 \times 10^4$$

$$\text{Pr} := \frac{\mu_{\text{argon}} \cdot c_{\text{argon}}}{\lambda_{\text{argon}}} = 0.667$$

$$\text{Nu} := A_0 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n = 1.57$$

$$h_g := \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{argon}}}{s_{\text{ilmatala}}} = 1.763 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

U-arvo

$$h_{s,1} := h_{r,1} + h_g = 1.952 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$h_{s,2} := h_{r,2} + h_g = 5.463 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$h_t := \frac{1}{\frac{1}{h_{s,1}} + \frac{1}{h_{s,2}} + 18\text{mm} \cdot r_{\text{lasi}}} = 1.402 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$U := \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i}} = 1.132 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

## Lasin U-arvo, Passiivikupu

$$r_{\text{lasi}} := 1 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$A_0 := 0.16$$

$$T_m := 283 \text{K}$$

$$h_e := 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$n := 0.28$$

$$\epsilon_{\text{lasi}} := 0.837$$

$$\Delta T := 15 \text{K}$$

$$\epsilon_{\text{selektiivi}} := 0.037$$

$$h_i := 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$s_{\text{ilmatila}} := 12 \text{mm}$$

Argon

$$\rho_{\text{argon}} := 1.699 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu_{\text{argon}} := 2.164 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$\lambda_{\text{argon}} := 0.01684 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$c_{\text{argon}} := 519 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Säteily

$$h_{r,1} := \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{\epsilon_{\text{selektiivi}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{lasi}}} - 1} = 0.189 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

(selektiivipinta - lasipinta)

$$h_{r,2} := \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{\epsilon_{\text{selektiivi}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{lasi}}} - 1} = 0.189 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

(selektiivipinta - lasipinta)

Johtuminen

$$\text{Gr} := \frac{g \cdot s_{\text{ilmätala}}^3 \cdot \Delta T \cdot \rho_{\text{argon}}^2}{T_m \cdot \mu_{\text{argon}}^2} = 5.537 \times 10^3$$

$$\text{Pr} := \frac{\mu_{\text{argon}} \cdot c_{\text{argon}}}{\lambda_{\text{argon}}} = 0.667$$

$$\text{Nu} := A_0 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n = 1.596$$

$$h_g := \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{argon}}}{s_{\text{ilmätala}}} = 2.239 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

U-arvo

$$h_{s,1} := h_{r,1} + h_g = 2.428 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$h_{s,2} := h_{r,2} + h_g = 2.428 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$h_t := \frac{1}{\frac{1}{h_{s,1}} + \frac{1}{h_{s,2}} + 14.2\text{mm} \cdot r_{\text{lasi}}} = 1.194 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$U := \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_e}} = 1.023 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

**Orivent 01 jalusta, U-arvon laskenta EN 6946 mukaan****Materiaalien lämmönjohtavuudet**

$$\lambda_{\text{vaneri}} := 0.14 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{\text{mineraalivilla}} := 0.036 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{\text{silikaattilevy}} := 0.22 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{\text{puu}} := 0.12 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

**Pintavastukset**

$$R_{\text{si}} := 0.13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{se}} := 0.04 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

**Materiaalien paksuudet**

$$d_{\text{vaneri}} := 4\text{mm}$$

$$d_{\text{mineraalivilla}} := 70\text{mm}$$

$$d_{\text{silikaattilevy}} := 8\text{mm}$$

$$d_{\text{yläjuoksu}} := 70\text{mm}$$

$$d_{\text{alajuoksu}} := 70\text{mm}$$

$$d_{\text{keskitolppa}} := 70\text{mm}$$

$$d_{\text{nurkkatolppa}} := 70\text{mm}$$

$$R_{\text{vaneri}} := \frac{d_{\text{vaneri}}}{\lambda_{\text{vaneri}}}$$

$$R_{\text{silikaattilevy}} := \frac{d_{\text{silikaattilevy}}}{\lambda_{\text{silikaattilevy}}}$$

$$R_{\text{yläjuoksu}} := \frac{d_{\text{yläjuoksu}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{keskitolppa}} := \frac{d_{\text{keskitolppa}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{nurkkatolppa}} := \frac{d_{\text{nurkkatolppa}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{alajuoksu}} := \frac{d_{\text{alajuoksu}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{mineraalivilla}} := \frac{d_{\text{mineraalivilla}}}{\lambda_{\text{mineraalivilla}}}$$

$$A_{\text{tot}} := 1176\text{mm} \cdot 400\text{mm}$$

$$f_1 := \frac{320\text{mm} \cdot 45\text{mm} \cdot 2}{A_{\text{tot}}} = 0.061$$

$$f_2 := \frac{20\text{mm} \cdot 1176\text{mm}}{A_{\text{tot}}} = 0.05$$

$$f_3 := \frac{35\text{mm} \cdot 1176\text{mm}}{A_{\text{tot}}} = 0.088$$

$$f_4 := \frac{320\text{mm} \cdot (1176\text{mm} - 90\text{mm})}{A_{\text{tot}}} = 0.739$$

$$f_5 := \frac{1176\text{mm} \cdot 25\text{mm}}{A_{\text{tot}}} = 0.063$$

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 = 1$$

# LIITE 3

3/12

$$R_1 := R_{se} + R_{vaneri} + R_{nurkkatolppa} + R_{si}$$

$$R_2 := R_{se} + R_{yläjuoksu} + R_{silikaattilevy} + R_{si}$$

$$R_3 := R_{se} + R_{vaneri} + R_{alajuoksu} + R_{silikaattilevy} + R_{si}$$

$$R_4 := R_{se} + R_{vaneri} + R_{mineraalivilla} + R_{silikaattilevy} + R_{si}$$

$$R_5 := R_{se} + R_{alajuoksu} + R_{silikaattilevy} + R_{si}$$

$$R' := \frac{1}{\frac{f_1}{R_1} + \frac{f_2}{R_2} + \frac{f_3}{R_3} + \frac{f_4}{R_4} + \frac{f_5}{R_5}} = 1.5 \cdot \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{keski} := \frac{1}{\left( \frac{f_2 + f_5}{R_{yläjuoksu}} \right) + \frac{f_1}{R_{nurkkatolppa}} + \frac{f_3}{R_{alajuoksu}} + \frac{f_4}{R_{mineraalivilla}}}$$

$$R'' := R_{se} + R_{vaneri} + R_{keski} + R_{silikaattilevy} + R_{si} = 1.443 \cdot \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_T := \frac{R' + R''}{2} = 1.471 \cdot \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$U := \frac{1}{R_T} = 0.68 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Tarkastetaan tarvitseeko U-arvossa ottaa huomioon ilmarakojen korjaustermi

$$\Delta U'' := 0.01 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\Delta U_g := \Delta U'' \cdot \frac{R_{\text{mineraalivilla}}}{R_4} = 8.922 \times 10^{-3} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\Delta U := \Delta U_g$$

$$\frac{\Delta U}{U} = 1.313 \cdot \%$$

Korjaustermi vaikutus on alle 3 %, joten sitä ei tarvitse ottaa huomioon.



**Orivent 21 ja 41 jalusta, U-arvon laskenta EN 6946 mukaan****Materiaalien lämmönjohtavuudet**

$$\lambda_{\text{vaneri}} := 0.14 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{\text{mineraalivilla}} := 0.036 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{\text{teräsohutlevy}} := 50 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{\text{puu}} := 0.12 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

**Pintavastukset**

$$R_{\text{si}} := 0.13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{se}} := 0.04 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

**Materiaalien paksuudet**

$$d_{\text{vaneri}} := 4\text{mm}$$

$$d_{\text{mineraalivilla}} := 70\text{mm}$$

$$d_{\text{teräsohutlevy}} := 0.5\text{mm}$$

$$d_{\text{yläjuoksu}} := 70\text{mm}$$

$$d_{\text{alajuoksu}} := 70\text{mm}$$

$$d_{\text{keskitolppa}} := 70\text{mm}$$

$$d_{\text{nurkkatolppa}} := 70\text{mm}$$

$$R_{\text{vaneri}} := \frac{d_{\text{vaneri}}}{\lambda_{\text{vaneri}}}$$

$$R_{\text{teräsohutlevy}} := \frac{d_{\text{teräsohutlevy}}}{\lambda_{\text{teräsohutlevy}}}$$

$$R_{\text{yläjuoksu}} := \frac{d_{\text{yläjuoksu}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{keskitolppa}} := \frac{d_{\text{keskitolppa}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{nurkkatolppa}} := \frac{d_{\text{nurkkatolppa}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{alajuoksu}} := \frac{d_{\text{alajuoksu}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{mineraalivilla}} := \frac{d_{\text{mineraalivilla}}}{\lambda_{\text{mineraalivilla}}}$$

$$A_{\text{tot}} := 1176\text{mm} \cdot 400\text{mm}$$

$$f_1 := \frac{320\text{mm} \cdot 45\text{mm} \cdot 2}{A_{\text{tot}}} = 0.061$$

$$f_2 := \frac{20\text{mm} \cdot 1176\text{mm}}{A_{\text{tot}}} = 0.05$$

$$f_3 := \frac{35\text{mm} \cdot 1176\text{mm}}{A_{\text{tot}}} = 0.088$$

$$f_4 := \frac{320\text{mm} \cdot (1176\text{mm} - 90\text{mm})}{A_{\text{tot}}} = 0.739$$

$$f_5 := \frac{1176\text{mm} \cdot 25\text{mm}}{A_{\text{tot}}} = 0.063$$

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 = 1$$

# LIITE 3

7/12

$$R_1 := R_{se} + R_{vaneri} + R_{nurkkatolppa} + R_{si}$$

$$R_2 := R_{se} + R_{yläjuoksu} + R_{teräsohutlevy} + R_{si}$$

$$R_3 := R_{se} + R_{vaneri} + R_{alajuoksu} + R_{teräsohutlevy} + R_{si}$$

$$R_4 := R_{se} + R_{vaneri} + R_{mineraalivilla} + R_{teräsohutlevy} + R_{si}$$

$$R_5 := R_{se} + R_{alajuoksu} + R_{teräsohutlevy} + R_{si}$$

$$R' := \frac{1}{\frac{f_1}{R_1} + \frac{f_2}{R_2} + \frac{f_3}{R_3} + \frac{f_4}{R_4} + \frac{f_5}{R_5}} = 1.461 \cdot \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{keski} := \frac{1}{\left( \frac{f_2 + f_5}{R_{yläjuoksu}} \right) + \frac{f_1}{R_{nurkkatolppa}} + \frac{f_3}{R_{alajuoksu}} + \frac{f_4}{R_{mineraalivilla}}}$$

$$R'' := R_{se} + R_{vaneri} + R_{keski} + R_{teräsohutlevy} + R_{si} = 1.407 \cdot \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_T := \frac{R' + R''}{2} = 1.434 \cdot \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$U := \frac{1}{R_T} = 0.697 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Tarkastetaan tarvitseeko U-arvossa ottaa huomioon ilmarakojen korjaustermi

$$\Delta U'' := 0.01 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\Delta U_g := \Delta U'' \cdot \frac{R_{\text{mineraalivilla}}}{R_4} = 9.073 \times 10^{-3} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\Delta U := \Delta U_g$$

$$\frac{\Delta U}{U} = 1.301 \cdot \%$$

Korjaustermi vaikutus on alle 3 %, joten sitä ei tarvitse ottaa huomioon.

**Passiivikattokuvun jalusta, U-arvon laskenta EN 6946 mukaan****Materiaalien lämmönjohtavuudet**

$$\lambda_{\text{vaneri}} := 0.14 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{\text{PU}} := 0.023 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{\text{silikaattilevy}} := 0.22 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{\text{puu}} := 0.12 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

**Pintavastukset**

$$R_{\text{si}} := 0.13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{se}} := 0.04 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

**Materiaalien paksuudet**

$$d_{\text{vaneri}} := 4\text{mm}$$

$$d_{\text{PU}} := 80\text{mm}$$

$$d_{\text{silikaattilevy}} := 8\text{mm}$$

$$d_{\text{yläjuoksu}} := 89\text{mm}$$

$$d_{\text{alajuoksu}} := 80\text{mm}$$

$$d_{\text{keskitolppa}} := 80\text{mm}$$

$$d_{\text{nurkkatolppa}} := 80\text{mm}$$

$$R_{\text{vaneri}} := \frac{d_{\text{vaneri}}}{\lambda_{\text{vaneri}}}$$

$$R_{\text{silikaattilevy}} := \frac{d_{\text{silikaattilevy}}}{\lambda_{\text{silikaattilevy}}}$$

$$R_{\text{yläjuoksu}} := \frac{d_{\text{yläjuoksu}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{keskitolppa}} := \frac{d_{\text{keskitolppa}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{nurkkatolppa}} := \frac{d_{\text{nurkkatolppa}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{alajuoksu}} := \frac{d_{\text{alajuoksu}}}{\lambda_{\text{puu}}}$$

$$R_{\text{PU}} := \frac{d_{\text{PU}}}{\lambda_{\text{PU}}}$$

$$A_{\text{tot}} := 1176\text{mm} \cdot 400\text{mm}$$

$$f_1 := \frac{320\text{mm} \cdot 45\text{mm} \cdot 2}{A_{\text{tot}}} = 0.061$$

$$f_2 := \frac{20\text{mm} \cdot 1176\text{mm}}{A_{\text{tot}}} = 0.05$$

$$f_3 := \frac{35\text{mm} \cdot 1176\text{mm}}{A_{\text{tot}}} = 0.088$$

$$f_4 := \frac{320\text{mm} \cdot (1176\text{mm} - 90\text{mm})}{A_{\text{tot}}} = 0.739$$

$$f_5 := \frac{1176\text{mm} \cdot 25\text{mm}}{A_{\text{tot}}} = 0.063$$

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 = 1$$

$$R_1 := R_{se} + R_{vaneri} + R_{nurkkatolppa} + \frac{8\text{mm}}{\lambda_{PU}} + R_{si}$$

$$R_2 := R_{se} + R_{yläjuoksu} + R_{silikaattilevy} + R_{si}$$

$$R_3 := R_{se} + R_{vaneri} + R_{alajuoksu} + R_{silikaattilevy} + R_{si}$$

$$R_4 := R_{se} + R_{vaneri} + R_{PU} + R_{silikaattilevy} + R_{si}$$

$$R_5 := R_{se} + R_{alajuoksu} + R_{silikaattilevy} + R_{si}$$

$$R' := \frac{1}{\frac{f_1}{R_1} + \frac{f_2}{R_2} + \frac{f_3}{R_3} + \frac{f_4}{R_4} + \frac{f_5}{R_5}} = 2.124 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{keski} := \frac{1}{\left( \frac{f_2 + f_5}{R_{yläjuoksu}} \right) + \frac{f_1}{R_{nurkkatolppa}} + \frac{f_3}{R_{alajuoksu}} + \frac{f_4}{R_{PU}}}$$

$$R'' := R_{se} + R_{vaneri} + R_{keski} + R_{silikaattilevy} + R_{si} = 1.938 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$R_T := \frac{R' + R''}{2} = 2.031 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$U := \frac{1}{R_T} = 0.492 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Tarkastetaan tarvitseeko U-arvossa ottaa huomioon ilmarakojen korjaustermi

$$\Delta U'' := 0.01 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\Delta U_g := \Delta U'' \cdot \frac{R_{PU}}{R_4} = 9.367 \times 10^{-3} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\Delta U := \Delta U_g$$

$$\frac{\Delta U}{U} = 1.903 \cdot \%$$

Korjaustermi vaikutus on alle 3 %, joten sitä ei tarvitse ottaa huomioon.